

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 330, № 6, 2019

# ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

## Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)  
Рихванов Л.П., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Оствальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)  
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)  
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)  
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)  
Конторович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)  
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)  
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)  
Тойпель У., Dsc (Германия)  
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)  
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)  
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)  
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)  
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)  
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)  
Руи Д., PhD (Португалия)  
Зиятдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)  
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)  
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)  
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)  
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)  
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)  
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)  
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)  
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)  
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)  
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)  
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)  
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)  
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)  
Кирынова Л.Г., выпуск. редактор, канд. филос. наук (Россия)  
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединённом каталоге  
«Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2019

## УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» – рецензируемый научный журнал, издающийся с 1903 года.

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ за 2015 г. – 0,339  
(без самоцитирования – 0,287)

«Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» публикует оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области геологии, разведки и добычи полезных ископаемых, технологии транспортировки и глубокой переработки природных ресурсов, энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе полезных ископаемых, а также безопасной утилизации геоактивов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей. Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов и вопросы геоэкологии
- Инженерная геология Евразии и окраинных морей.

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com)

**BULLETIN  
OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY  
GEO ASSETS ENGINEERING**

Volume 330, № 6, 2019

# BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY. GEO ASSETS ENGINEERING

## Editorial Board

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)  
 Rikhvanov L.P., Dr. Sc. (Russia)  
 Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)  
 Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)  
 Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)  
 Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)  
 Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)  
 Belozerov V.B., Dr. Sc. (Russia)  
 Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)  
 Silkin V.M., PhD (Spain)  
 Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)  
 Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)  
 Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)  
 Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)  
 Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)  
 Teipel U., Dsc (Germany)  
 Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)  
 Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)  
 Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)  
 Hanjalic K., Dsc (Netherlands)  
 Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)  
 Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia)  
 Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)  
 Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)  
 Rui D., PhD (Portugal)  
 Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)  
 Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)  
 Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)  
 Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)  
 Lotov V.A., Dr. Sc. (Russia)  
 Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)  
 Bouznik V.M., Dr. Sc. (Russia)  
 Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)  
 Antipenko V.R., Dr. Sc. (Russia)  
 Golik V.I., Dr. Sc. (Russia)  
 Abutalipova E.M., Dr. Sc. (Russia)  
 Polishchuk V.I., Dr. Sc. (Russia)  
 Khamitov R.N., Dr. Sc. (Russia)  
 Zyuzev A.M., Dr. Sc. (Russia)  
 Kiryanova L.G., managing editor, Cand. Sc. (Russia)  
 Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

## AIMS AND SCOPE

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is peer-reviewed journal owned by Tomsk Polytechnic University.

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate PE no. FM 77-65008, March 04, 2016 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communicationss).

ISSN (print) – 2500-1019  
 ISSN (on-line) – 2413-1830

The journal publishes research papers in the field defined as "life cycle of georesources". It presents original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in geology, exploration and extraction of mineral resources, transportation technologies and deep processing of natural resources, energy-efficient production and energy conversion based on mineral resources as well as on safe disposal of geo assets.

The journal will be of interest to geologists, chemists, engineers, physicists, ecologists, power engineers, specialists in storage and transportation of energy resources, IT specialists as well as to other specialists in the related fields.

Scope of the journal issue "Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering" in accordance with Geo Assets (GA) strategy includes:

- Geo Assets Exploration and Refining;
- Geo Assets Mining;
- Geo Assets Transportation;
- Geo Assets Deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and questions Geoecology;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest 2 potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on  
[www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [scholar.google.com](http://scholar.google.com).

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Инжекция жидкого диоксида углерода в пласт, насыщенный метаном и его газогидратом**  
 Хасанов М.К., Столповский М.В., Гималтдинов И.К.  
**Трансформация почв субарктической зоны тюменской области на этапе промышленного освоения территории**  
 Чистякова Н.Ф., Гайнуллина И.Н.
- Лидар для измерения вертикального распределения озона в атмосфере**  
 Долгий С.И., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Романовский О.А., Харченко О.В.
- Оптимизация маршрутов прокладки магистрального трубопровода для транспортировки георесурсов**  
 Токтошов Г.Ы., Юргенсон А.Н., Мигов Д.А.
- Оценка влияния различных способов и аппаратов защиты от импульсных перенапряжений в электрической сети напряжением 6–10 кВ нефтяных промыслов**  
 Сидоров С.В., Сушков В.В., Сухачев И.С.
- Задача управления процессом каталитического риформинга и метод ее решения**  
 Матвейкин В.Г., Дмитриевский Б.С., Кокуев А.Г., Джамбеков А.М.
- Разработка дизайна гидродинамического исследования в условиях карбонатного коллектора**  
 Давыдова А.Е., Щуренко А.А., Дадакин Н.М., Шуталев А.Д., Квеско Б.Б.
- Возможности метода радиокип при изучении верхней части разреза в рудных районах**  
 Давыдов В.А.
- Интенсивности процессов наложенного эпигенеза как индикаторы нефтенасыщенности песчаных коллекторов**  
 Мельник И.А.
- Исследования высокотемпературной коррозии SiC-покрытия на графите**  
 Аскербек С.К., Чихрай Е.В., Понкратов Ю.В., Никитенков Н.Н.
- К вопросу исследования состава углеводородных газов угольных пластов и пыли с целью возможного прогнозирования их потенциальной опасности**  
 Ганова С.Д., Скопинцева О.В., Исаев О.Н.
- Особенности элементного состава *filipendula ulmaria* (L.) Maxim (rosaceae) на территории Ново-Урского хвостохранилища в Кемеровской области**  
 Горбатюк Е.А., Барановская Н.В., Жданов В.А.
- Природно-техногенные катастрофы как проявления геодинамической неустойчивости земной коры**  
 Борисов К.И., Горшков Л.К., Софьян А.П., Федорова Л.А.
- Прогноз геологического разреза на основе детальной обработки сейсмических материалов в программно-алгоритмическом комплексе «Геосейф»**  
 Кочегуров А.И., [Иванченков В.П.], Орлов О.В.
- Проблемы рудной геологии и человеческий фактор. Часть 3. Метаморфизм и мезотермальное рудообразование**  
 Кучеренко И.В.
- Геологическое развитие и нефтегазоносность локальных поднятий Бакинского архипелага Южно-Каспийского бассейна**  
 Нариманов Н.Р., Мухтарова Х.З., Насибова Г.Д.
- Моделирование распространения в атмосфере загрязняющих веществ выбросов электростанций на базе программного комплекса «СКАТ»**  
 Антонова А.М., Воробьев А.В., Воробьев В.А., Дутова Е.М., Покровский В.Д.
- 7 Injection of liquid carbon dioxide in reservoir saturated by methane and its gas hydrate**  
 Khasanov M.K., Stolpovskii M.V., Gimaltdinov I.K.
- 17 Transformation of soils of subarctic zone in Tyumen region at the stage of industrial development of the territory**  
 Chistyakova N.F., Gaynullina I.N.
- 28 Lidar for measurement of ozone vertical distribution in the atmosphere**  
 Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V.
- 41 Optimization of routes for laying trunk pipeline to transport geo-resources**  
 Toktoshov G.Y., Yurgenson A.N., Migov D.A.
- 50 Estimation of the effect of various methods and devices of impulse overvoltage protection in the oil field electric network 6–10 kV**  
 Sidorov S.V., Sushkov V.V., Sukhachev I.S.
- 59 Problem of control of catalytic reforming and method of its solutions**  
 Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Kokuev A.G., Dzhambekov A.M.
- 68 Well testing design development in carbonate reservoir**  
 Davydova A.E., Shchurenko A.A., Dadakin N.M., Shutalev A.D., Kvesko B.B.
- 80 Opportunities of VLF method when studying the top section in ore areas**  
 Davydov V.A.
- 90 Intensities of superimposed epigenesis as indicators of oil saturation in sandstone reservoirs**  
 Melnik I.A.
- 98 Research of high-temperature corrosion of SiC-coating on graphite**  
 Askerbekov S.K., Chikhray E.V., Ponkratov Yu.V., Nikitenkov N.N.
- 109 On the issue of studying the composition of hydrocarbon gases of coals and dust to predict their potential hazard**  
 Ganova S.D., Skopintseva O.V., Isaev O.N.
- 116 Geochemical features of the *filipendula ulmaria* (L.) maxim (rosaceae) elemental composition in the territory of Novo-Urskoe tailing, Kemerovo region**  
 Gorbatyuk E.A., Baranovskaya N.V., Zhdanov V.A.
- 126 Natural-technological disasters as manifestations of geodynamic instability of the Earth's crust**  
 Borisov K.I., Gorshkov L.K., Sofin A.P., Fedorova L.A.
- 134 Forecast of geological profile based on detailed processing of seismic materials in the software-algorithmic complex «Geoseif»**  
 Kochegurov A.I., [Ivanchenkov V.P.], Orlov O.V.
- 145 Ore geology problems and the human factor. Part 3. Metamorphism and mesothermal oreformation**  
 Kucherenko I.V.
- 164 Geological evolution and oil and gas content of local uplifts of the Baku archipelago of the South Caspian basin**  
 Narimanov N.R., Mukhtarova Kh.Z., Nasibova G.J.
- 174 Modelling distribution of contaminating substances of electric power emissions in the atmosphere on the basis of the SKAT programming complex**  
 Antonova A.M., Vorobev A.V., Vorobev V.A., Dutova E.M., Pokrovskiy V.D.

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Алгоритмы обработки и инверсии данных электромагнитного зонда с тороидальными катушками при изучении макроанизотропных свойств пластов-коллекторов</b><br/>             Эпов М.И., Михайлов И.В., Глинских В.Н., Никитенко М.Н., Суродин И.В.</p> <p><b>Возможности геофизических методов для прогнозирования трещиноватости коллекторов</b><br/>             Орехов А.Н., Аmani Мангуа Марк М.</p> <p><b>Комплексная рекультивация территории Павельцевской нефтебазы</b><br/>             Островский Ю.В., Заборцев Г.М., Черноок В.А., Крестинин А.А.</p> | <p><b>187 Algorithms of data processing and inversion for an electromagnetic tool with toroidal coils when studying macroanisotropic properties of reservoirs</b><br/>             Epov M.I., Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Surodina I.V.</p> <p><b>198 Possibilities of geophysical methods for predicting reservoir fractures</b><br/>             Orekhov A.N., Amani Mangoua Marc M.</p> <p><b>210 Comprehensive recultivation of soils of the Paveltsevskaaya tank farm</b><br/>             Ostrovsky Yu.V., Zabortsev G.M., Chernook V.A., Krestinin A.A.</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

УДК 622.279.72

## ИНJEKЦИЯ ЖИДКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПЛАСТ, НАСЫЩЕННЫЙ МЕТАНОМ И ЕГО ГАЗОГИДРАТОМ

Хасанов Марат Камилович<sup>1</sup>,  
hasanovmk@mail.ru

Столповский Максим Владимирович<sup>2,1</sup>,  
s\_maxim.pmm@mail.ru

Гималтдинов Ильяс Кадилович<sup>2</sup>,  
iljas\_g@mail.ru

<sup>1</sup> Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,  
Россия, 453103, г. Стерлитамак, пр. Ленина, 49.

<sup>2</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет,  
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

**Актуальность** исследования связана с разработкой теоретических основ технологий добычи газа из газогидратных месторождений методом замещения. Рассматривается метод инъекции диоксида углерода, позволяющий значительно снизить энергетические затраты на разработку природных газогидратных залежей.

**Целью** исследования является выяснение особенностей протекания процесса замещения метана диоксидом углерода в газогидрате при инъекции жидкого диоксида углерода в газогидратный пласт.

**Объект:** пористый пласт конечной протяженности, насыщенный метаном и его газогидратом, исходные давление и температура которого соответствуют условиям стабильного существования газогидрата метана.

**Методы.** На основе уравнений механики сплошной среды построена математическая модель тепломассопереноса в природном пласте, сопровождающаяся замещением метана на диоксид углерода в газогидрате. Принято, что в рассматриваемом случае в пласте возникают две характерные зоны, разделенные подвижной границей фазовых переходов. В первой (ближней) зоне поры насыщены жидкой двуокисью углерода и ее газогидратом, а во второй (дальней) зоне содержатся метан и его газогидрат.

**Результаты.** Получены численные решения для полей давления и температуры при инъекции жидкого диоксида углерода в газогидратный пласт конечной протяженности. Построены зависимости температуры на границе замещения от давления инъекции и проницаемости пласта. Установлено, что при достаточно низких значениях давления инъекции и проницаемости величина температуры на границе замещения может подниматься выше равновесного значения температуры диссоциации газогидрата метана на газ и воду. Это соответствует возникновению второй подвижной межфазной границы, на которой происходит разложение газогидрата метана. Найдена зависимость предельной температуры закачиваемой жидкой двуокиси углерода, выше которой необходимо учитывать образование смеси метана и воды, от значений давления на правой и левой границах пласта и его проницаемости. Установлено, что режим с разложением газогидрата реализуется при высоких значениях давления на правой границе пласта и низких значениях проницаемости и давления, под которым закачивается двуокись углерода. Получены зависимости скорости границы замещения, а также времени полной замены газогидрата метана на газогидрат диоксида углерода во всем пласте от давления на правой и левой границах пласта, а также от его проницаемости.

### Ключевые слова:

Газогидрат метана, диоксид углерода, фильтрация, пористый пласт, замещение.

### Введение

В настоящее время природные газовые гидраты рассматриваются как один из возможных и практически неисчерпаемых источников газа (метана). Использование традиционных методов добычи газа из газогидратных залежей (снижение давления на забое добывающей скважины, нагрев пласта или закачка ингибиторов) зачастую бывает экономически нецелесообразным, а также может оказать неблагоприятное воздействие на окружающую среду. В связи с этим был предложен новый метод добычи природного газа, заключающийся в инъекции углекислого газа (жидкого или газообразного) в метаногидратные пласты. Данный метод обусловлен тем, что гидрат  $\text{CO}_2$  термодинамически более стабилен, чем гидрат  $\text{CH}_4$  [1–11]. Поэтому диоксид углерода может замещать метан в его гидрате. При этом наряду с извлечением при-

родного газа может частично решаться проблема утилизации диоксида углерода, вносящего значительный вклад в развитие парникового эффекта.

Результаты экспериментальных исследований образования газогидрата  $\text{CO}_2$  и замещения метана в газогидрате на диоксид углерода приведены, в частности, в работах [1–14]. В работах [15–17] представлены результаты математического моделирования процесса инъекции диоксида углерода в полубесконечный пористый пласт. Для таких пластов влияние правой границы на процессы тепломассопереноса оказывается несущественным. Однако для более детального описания процессов, происходящих в пористых средах при инъекции жидкого диоксида углерода, необходимо учитывать конечную протяженность гидратонасыщенных пластов. В настоящей работе представлены результаты численного моделирования инъекции

жидкой двуокиси углерода в пористый пласт конечной протяженности, изначально насыщенный метаном и его гидратом.

#### Постановка задачи

Рассмотрим пористый пласт длины  $L$  ( $0 \leq x \leq L$ ), кровля и подошва которого непроницаемы и теплоизолированы. Пусть пласт в начальный момент времени насыщен метаном и его гидратом, температура  $T_0$  и давление  $p_0$  которых соответствуют условиям существования метаногидрата. Через его левую границу ( $x=0$ ) закачивается жидкий диоксид углерода, давление  $p_e$  и температура  $T_e$  которого соответствуют условиям стабильного существования гетерогенной смеси жидкой двуокиси углерода и ее гидрата.

Условия стабильного существования газовых гидратов принято изображать с помощью фазовых диаграмм [18]. На рис. 1 представлена диаграмма фазового равновесия гидратов метана и диоксида углерода.

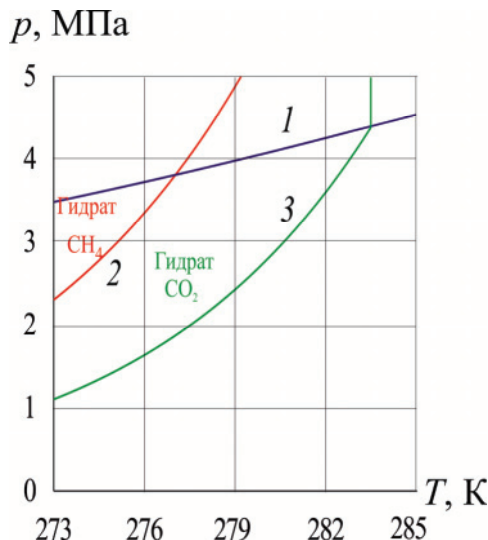


Рис. 1. Диаграмма фазового равновесия гидратов метана и диоксида углерода

Fig. 1. Diagram of phase equilibrium of methane hydrates and carbon dioxide

На рис. 1 кривые 2 и 3 соответствуют условиям фазового равновесия систем «CH<sub>4</sub> (газ) – гидрат CH<sub>4</sub> – вода» и «CO<sub>2</sub> (газ) – гидрат CO<sub>2</sub> – вода». Линия 1 определяет равновесное состояние между жидким и газообразным диоксидом углерода. Таким образом, начальным параметрам системы ( $T_0, p_0$ ) на фазовой диаграмме соответствует точка, лежащая выше кривой 2, а параметрам инжектируемой жидкости ( $T_e, p_e$ ) – точка, лежащая выше линии 1.

В результате нагнетания через левую границу пласта жидкого диоксида углерода в пласте образуются две характерные области (рис. 2): ближняя, содержащая жидкий CO<sub>2</sub> и его гидрат, и дальняя, содержащая CH<sub>4</sub> и его гидрат. При этом возникает устойчивая подвижная граница фазового

перехода  $x_{(m)}$ , на которой происходит замещение метана в газогидрате двуокисью углерода. Устойчивость границы фазового перехода обусловлена ламинарностью течения в пористой среде, а также тем, что вязкость жидкой двуокиси углерода на порядок выше вязкости метана. В рассматриваемой задаче будем пренебрегать диффузией двуокиси углерода и метана, т. к. вследствие непрерывной закачки диоксида углерода в пласт интенсивность массопереноса, обусловленного фильтрацией в проницаемой пористой среде, значительно превышает интенсивность массопереноса, обусловленного диффузией.

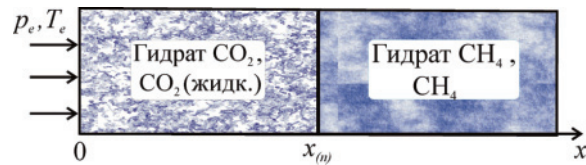


Рис. 2. Схема областей, формируемых при закачке жидкой двуокиси углерода

Fig. 2. Areas formed at injection of liquid carbon dioxide

#### Основные уравнения

При описании процессов тепломассопереноса примем следующие допущения: пористость постоянна; газогидраты метана и диоксида углерода неподвижны и несжимаемы; температура пористой среды и насыщающего ее вещества постоянна. Гидраты CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> являются двухкомпонентными системами с массовой концентрацией газа  $G_c$  и  $G_m$  соответственно. При этом газ (метан) считается калорически совершенным, а жидкость (двуокись углерода) – упругой жидкостью.

Система основных уравнений, представляющая собой уравнения сохранения массы метана и двуокиси углерода, энергии, закон Дарси, уравнение состояния калорически совершенного газа и упругой жидкости в плоскооднородном приближении, при отмеченных допущениях имеет вид [15–17, 19–24]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_j \phi S_j) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_j \phi S_j v_j) &= 0, \\ \rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_j \tilde{N}_j \phi S_j v_j \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) &= 0, \\ \phi S_j v_j &= - \frac{k_j}{\mu_j} \frac{\partial p}{\partial x}, \end{aligned}$$

$$\rho_c = \rho_{0c}(1 + \beta(p - p_0)), \quad \rho_m = p/R_m T, \quad k_j = k_0 S_j^3. \quad (1)$$

Здесь  $\phi$  – пористость;  $p$  – давление;  $T$  – температура;  $\rho_j$ ,  $S_j$ ,  $v_j$ ,  $k_j$ ,  $C_j$  и  $\mu_j$  – соответственно плотность, насыщенность, скорость, фазовая проницаемость, удельная теплоемкость и динамическая вязкость метана ( $j=m$ ) и диоксида углерода ( $j=c$ );  $R_m$  – газовая постоянная метана;  $\rho_{0c}$  – плотность жидкого диоксида углерода, соответствующая давлению  $p_0$ ;  $\beta$  – коэффициент объемного сжатия CO<sub>2</sub>;  $k_0$  – абсолютная проницаемость;  $\rho C$  и  $\lambda$  – удельная объе-

мая теплоемкость и коэффициент теплопроводности системы.

Условия баланса массы диоксида углерода и метана на границе вытеснения метана диоксидом углерода с учетом замещения  $\text{CH}_4$  на  $\text{CO}_2$  в составе газогидрата имеют вид [15, 16]:

$$\begin{aligned}\rho_c S_c (v_c - \dot{x}_{(n)}) &= \rho_{hc} S_{hc} G_c \dot{x}_{(n)}, \\ \rho_m S_m (v_m - \dot{x}_{(n)}) &= \rho_{hm} S_{hm} G_m \dot{x}_{(n)},\end{aligned}$$

где  $\rho_{hj}$ ,  $S_{hj}$  – плотность и насыщенность пор для газогидрата диоксида углерода ( $j=c$ ) и газогидрата метана ( $j=m$ ),  $\dot{x}_{(n)}$  – скорость движения границы, на которой происходит замещение. Нижний индекс  $n$  относится к параметрам на границе замещения.

С учетом последней системы уравнений и закона Дарси условия баланса массы и тепла на границе между первой и второй областями можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}-\frac{k_c}{\mu_c} \frac{\partial p_{(1)}}{\partial x} &= \phi \left( \frac{\rho_{hc}}{\rho_c} S_{hc} G_c + S_c \right) \dot{x}_{(n)}, \\ -\frac{k_m}{\mu_m} \frac{\partial p_{(2)}}{\partial x} &= \phi \left( \frac{\rho_{hm}}{\rho_m} S_{hm} G_m + S_m \right) \dot{x}_{(n)}, \\ \phi S_{hc} \rho_{hc} (1 - G_c) \dot{x}_{(n)} &= \phi S_{hm} \rho_{hm} (1 - G_m) \dot{x}_{(n)}, \\ \lambda \frac{\partial T_{(1)}}{\partial x} - \lambda \frac{\partial T_{(2)}}{\partial x} &= \phi (\rho_{hc} L_{hc} S_{hc} - \rho_{hm} L_{hm} S_{hm}) \dot{x}_{(n)}. \quad (2)\end{aligned}$$

Здесь  $L_{hj}$  – теплота образования газогидратов диоксида углерода ( $j=c$ ) и метана ( $j=m$ ),  $p_{(i)}$  и  $T_{(i)}$  – давление и температура в первой ( $i=1$ ) и второй ( $i=2$ ) областях.

Начальные условия, а также условия на границах пласта имеют вид:

$$\begin{aligned}t=0: \quad p &= p_0, \quad T = T_0 \quad (0 \leq x \leq L); \\ x=0: \quad p &= p_e, \quad T = T_e \quad (t > 0); \\ x=L: \quad p &= p_0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (t > 0).\end{aligned} \quad (3)$$

Пусть исходная объемная насыщенность пор гидратом метана равна  $S_{hm} = v$ , тогда из второго уравнения системы (2) для объемной насыщенности гидратом  $\text{CO}_2$  в первой области получим:

$$S_{hc} = \rho_{hm} (1 - G_m) (\rho_{hc} (1 - G_c))^{-1} v.$$

На основе системы (1) уравнения пьезопроводности и температуропроводности для каждой из областей запишутся в виде:

$$\begin{aligned}\frac{\partial p_{(1)}}{\partial t} &= \frac{k_c}{\mu_c \phi \beta S_c \exp(\beta(p_1 - p_0))} \times \\ &\times \frac{\partial}{\partial x} \left( \exp(\beta(p_1 - p_0)) \frac{\partial p_{(1)}}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial T_{(1)}}{\partial t} &= \chi^{(r)} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T_{(1)}}{\partial x} \right) + \\ &+ \frac{\rho_{0c} \exp(\beta(p_1 - p_0)) C_c k_c}{\rho \tilde{N} \mu_c} \frac{\partial p_{(1)}}{\partial x} \frac{\partial T_{(1)}}{\partial x}, \quad (4)\end{aligned}$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial t} = \frac{k_m}{\phi S_m \mu_m} \frac{\partial}{\partial x} \left( p_2 \frac{\partial p_2}{\partial x} \right),$$

$$\frac{\partial T_{(2)}}{\partial t} = \chi^{(r)} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T_{(2)}}{\partial x} \right) + \frac{p_{(2)} \tilde{N}_m k_m}{R_m T_{(2)} \rho C \mu_m} \frac{\partial p_{(2)}}{\partial x} \frac{\partial T_{(2)}}{\partial x}, \quad (5)$$

где  $\chi^{(r)} = \lambda / \rho C$  – коэффициент температуропроводности пласта; индексы  $i=1,2$  относятся к параметрам первой и второй зон соответственно.

Полученная система уравнений (4), (5) с начальными и граничными условиями (3), а также условиями (2) на подвижной границе фазовых переходов является замкнутой. Для ее решения каждое из дифференциальных уравнений представляется в виде неявной конечно-разностной схемы. При этом используем метод ловли фронта в узел пространственной сетки, суть которого заключается в том, что за неизвестный и определяемый в ходе решения задачи временной шаг фронт фазового перехода перемещается по координатной сетке ровно на один шаг. Решение системы уравнений проводилось на каждом временном слое с помощью метода прогонки в сочетании с методом итераций до достижения заданной точности, как по давлению, так и по температуре. Число точек разбиения по пространственной координате полагалось равным  $n=2000$ .

#### Результаты расчетов

На рис. 3 для момента времени  $t=30$  сут. представлены распределения температуры и давления в пласте при нагнетании жидкой двуокиси углерода под давлением  $p_e=4,0$  МПа. Для других параметров приняты значения [15–24]:  $\phi=0,2$ ,  $v=0,2$ ,  $k_0=10^{-16}$  м<sup>2</sup>,  $p_0=3,5$  МПа,  $T_0=274$  К,  $\rho C=2,5 \cdot 10^6$  Дж/(К·м<sup>3</sup>),  $\lambda=2$  Вт/(м·К),  $G_c=0,28$ ,  $G_m=0,13$ ,  $R_m=520$  Дж/(кг·К),  $\rho_{hc}=1100$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{hm}=900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{c0}=890$  кг/м<sup>3</sup>,  $\beta=10^{-8}$  Па<sup>-1</sup>,  $\mu_c=10^{-4}$  Па·с,  $\mu_m=10^{-5}$  Па·с,  $L_{hc}=3,54 \cdot 10^5$  Дж/кг,  $L_{hm}=4,5 \cdot 10^5$  Дж/кг,  $C_c=2600$  Дж/(кг·К),  $C_m=1560$  Дж/(кг·К),  $L=100$  м.

Как следует из рис. 3, а, при относительно невысокой температуре закачиваемой двуокиси углерода температура в области, содержащей метан и его гидрат, лежит ниже его равновесной температуры разложения (штриховая линия), определяемой выражением [25]:

$$\ln p = A - B / T,$$

где  $A=29,112$ ,  $B=7694,30$ . Следовательно, в этом случае решение с одной границей фазового перехода является термодинамически непротиворечивым. При увеличении температуры закачиваемого диоксида углерода (рис. 3, б) величина температуры в области, содержащей газогидрат метана, на некотором участке поднимается выше равновесного значения температуры его разложения. В этом случае решение с одной подвижной границей фазового перехода (границей замещения) не позволяет построить термодинамически непротиворечивое решение. Поэтому необходимо вводить дополнительную границу фазовых превращений, на которой происходит диссоциация газогидрата  $\text{CH}_4$  на

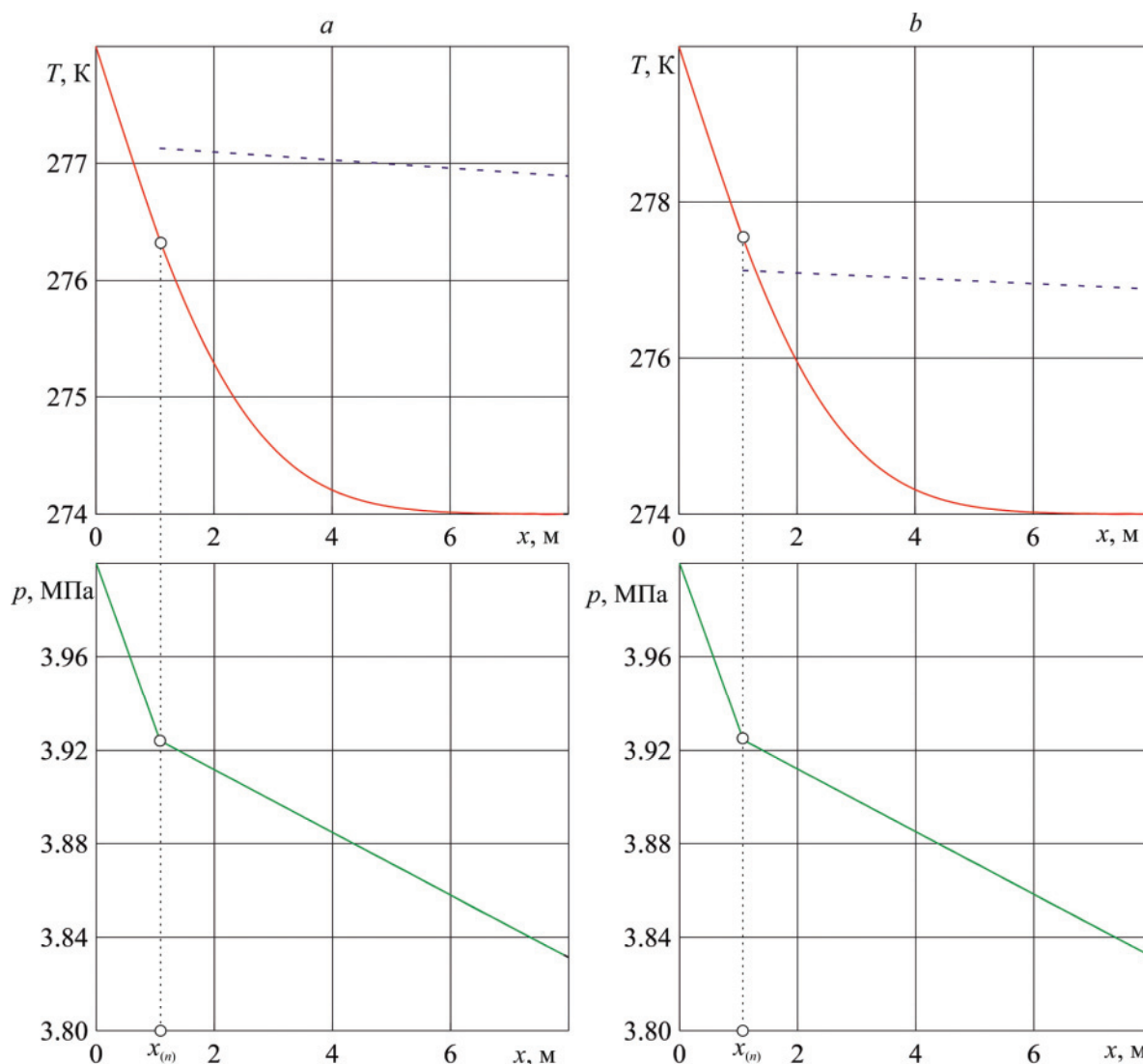


Рис. 3. Распределение температуры и давления пласта в момент времени  $t=30$  сут.  $T_c=278$  К (а) и 280 К (б)

Fig. 3. Distribution of the temperature and pressure of the reservoir at  $t=30$  days.  $T_c=278$  K (a) и 280 K (b)

газ и воду. В этом случае в пласте будет возникать промежуточная область, содержащая метан и воду в свободном состоянии.

На рис. 4 приведена зависимость температуры и координаты границы замещения от давления, под которым закачивается диоксид углерода (а), и проницаемости пласта (б) в момент времени  $t=10$  сут. Штриховая линия показывает равновесную температуру разложения газогидрата метана, соответствующую вычисленному значению давления на границе замещения.

В соответствии с рис. 4 при понижении давления инъекции и проницаемости пласта температура на границе замещения возрастает. Это обусловлено снижением скорости границы замещения и соответственно возрастанием влияния более горячей левой границы на величину температуры данной границы. Поэтому при достаточно низких значениях проницаемости пласта и давления, под которым закачивается двуокись углерода, величина

температуры пласта на границе замещения может подниматься выше равновесного значения температуры диссоциации газогидрата метана. Это соответствует возникновению дополнительной области, насыщенной продуктами разложения газогидрата метана.

Были проведены расчеты для определения предельного значения температуры закачиваемой двуокиси углерода, выше которой необходимо учитывать образование смеси метана и воды. На рис. 5 представлена зависимость предельного значения температуры инъектируемой двуокиси углерода от давления, под которым закачивается диоксид углерода (а), и проницаемости пласта (б) для момента времени  $t=10$  сут. после начала закачки. Кривые 1 и 2 соответствуют значениям давления  $p_0$  на правой границе пласта 3,2 и 3,5 МПа. Согласно рис. 5, при повышении давления инъекции и проницаемости предельное значение температуры возрастает, причем тем быстрее, чем ниже

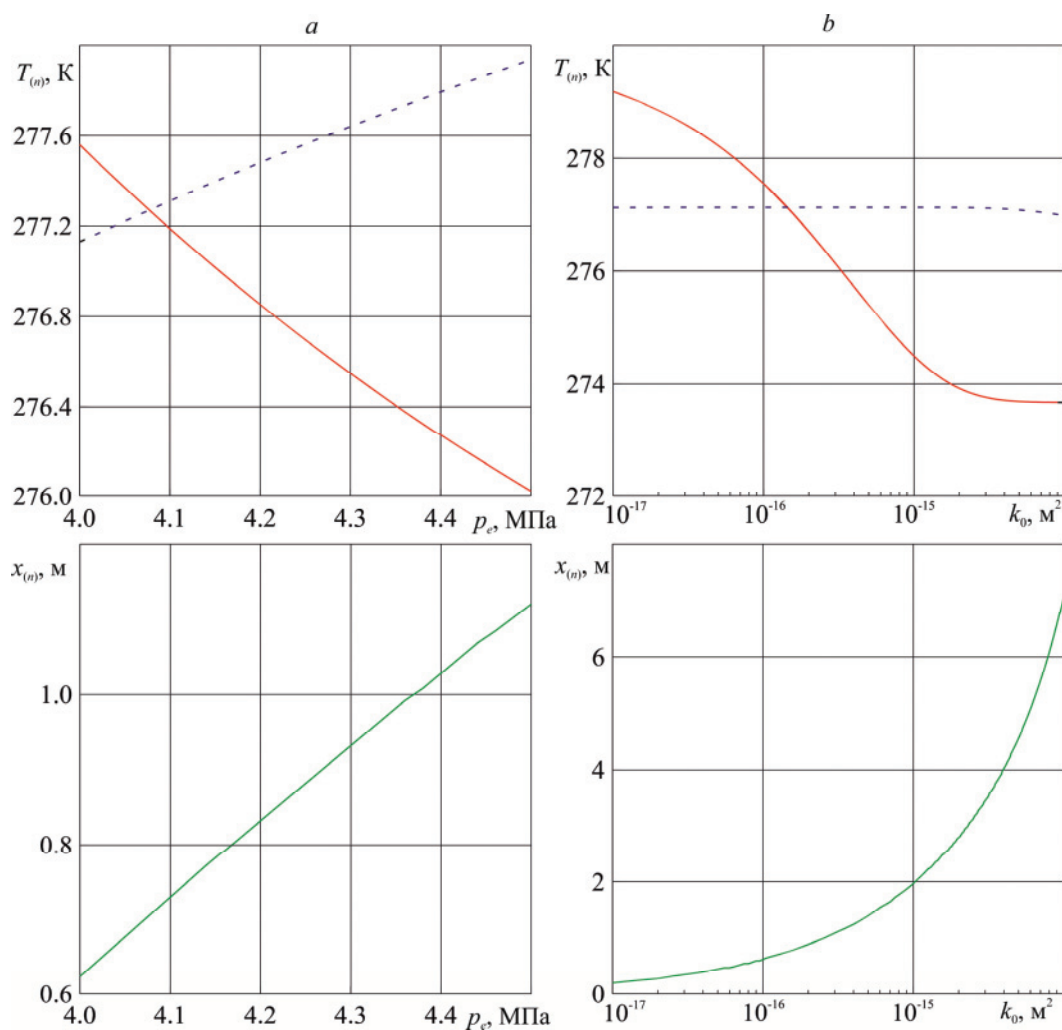


Рис. 4. Зависимость температуры и координаты границы замещения от давления, под которым закачивается двуокись углерода (а), и проницаемости пласта (б)

Fig. 4. Dependence of temperature and substitution boundary coordinate on the pressure at which carbon dioxide is injected (a), and on formation permeability (b)

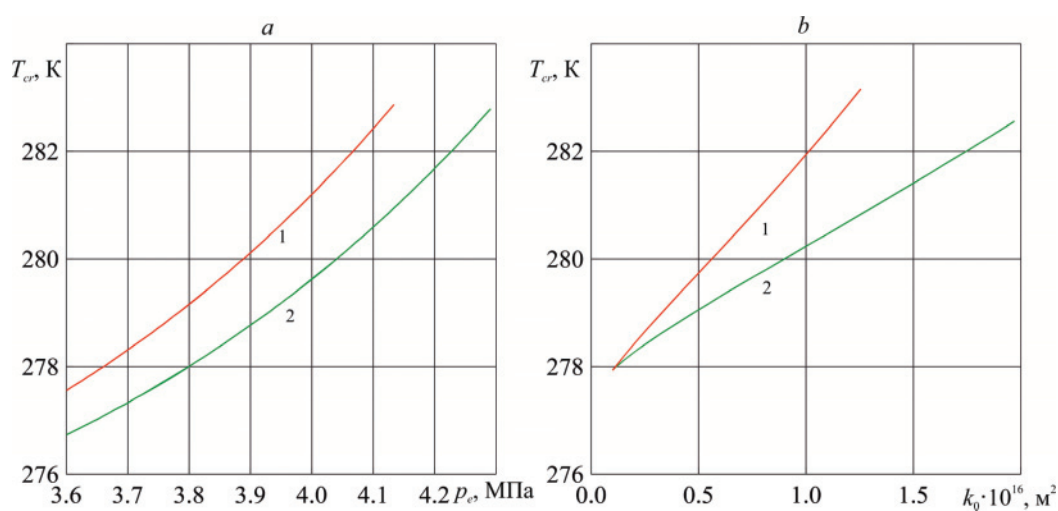


Рис. 5. Зависимость предельного значения температуры от давления инъекции двуокиси углерода (а) и абсолютной проницаемости пласта (б) для момента времени  $t=10$  сут.  $p_0=3,2$  МПа (кривая 1) и 3,5 МПа (кривая 2)

Fig. 5. Dependence of the temperature limit on carbon dioxide injection pressure (a) and the absolute permeability of the formation (b) for the time instant  $t=10$  days:  $p_0=3,2$  MPa (curve 1) and 3,5 MPa (curve 2)

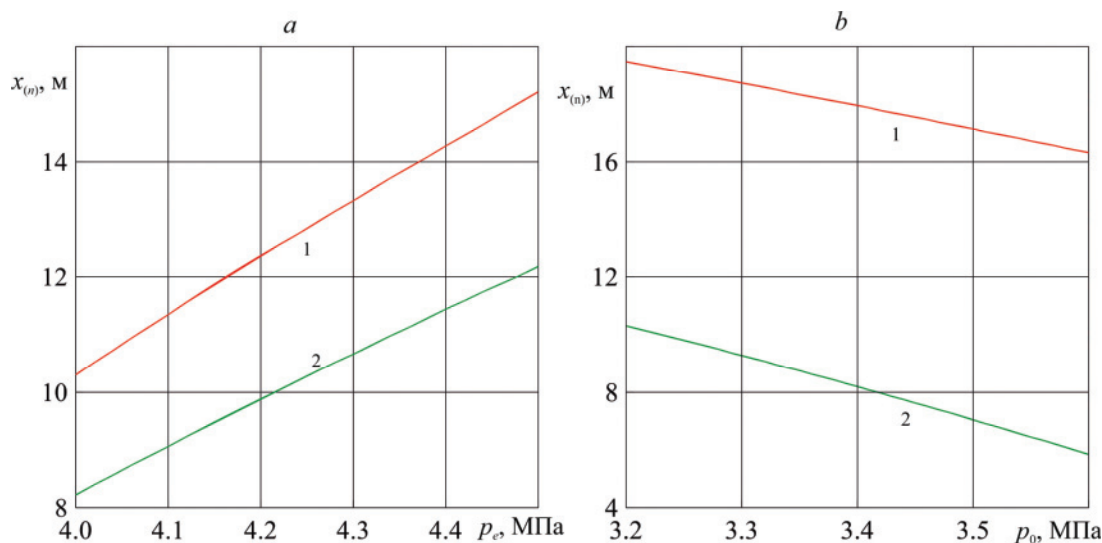


Рис. 6. Зависимость координаты границы фазового перехода от: а) давления инъекции:  $k_0=10^{-14} \text{ м}^2$  (кривая 1),  $7 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$  (кривая 2); б) давления на правой границе пласта:  $p_e=4 \text{ МПа}$  (кривая 1),  $5 \text{ МПа}$  (кривая 2)

Fig. 6. Dependence of the phase transition boundary coordinate on: a) injection pressure:  $k_0=10^{-14} \text{ м}^2$  (curve 1),  $7 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$  (curve 2); b) pressure on the right boundary of the layer:  $p_e=4 \text{ МПа}$  (curve 1),  $5 \text{ МПа}$  (curve 2)

давление на правой границе пласта. Следовательно, рассматриваемый в данной работе режим с замещением метана на двуокись углерода в газогидрате характерен для высоких значений перепада давления  $\Delta p = p_e - p_0$  в пласте и высокопроницаемых пористых сред. Это объясняется тем, что в этом случае скорость фильтрации диоксида углерода и соответственно границы замещения в газогидрате метана на двуокись углерода выше скорости распространения температурного фронта от более нагретой левой границы пласта. Поэтому область, насыщенная метаном и его газогидратом, не успевает прогреваться до значений температур, соответствующих разложения газогидрата метана на газ и воду.

На рис. 6 для момента времени  $t=10$  сут. представлены зависимости координаты границы фазового перехода от значений давления на левой (а) и правой (б) границах пласта. Температура нагнетаемой двуокиси углерода полагалась равной  $T_e=276 \text{ К}$ . Как следует из рисунка, с ростом давления инъекции и проницаемости, а также с уменьшением давления на правой границе пласта координата границы фазовых переходов увеличивается. Это объясняется тем, что скорость движения границы фазового перехода лимитируется скоростью поступления  $\text{CO}_2$  к границе фазового перехода, которая тем выше, чем больше перепад давления и выше проницаемость пласта.

Зависимость времени полного перехода гидрата метана в гидрат диоксида углерода во всем пласте протяженностью  $L=100 \text{ м}$  от давления, под которым закачивается жидкая двуокись углерода, представлена на рис. 7. Проницаемость пласта и температура инжестируемого диоксида углерода полагались равными  $k_0=10^{-14} \text{ м}^2$  и  $T_e=276 \text{ К}$ . Как следует из

рисунка, при увеличении давления, под которым закачивается двуокись углерода, а также при уменьшении давления на правой границе пласта время замещения метана в газогидрате на диоксид углерода во всем пласте уменьшается. Это объясняется тем, что при увеличении перепада давления в пласте, в соответствии с законом Дарси, увеличивается скорость фильтрации двуокиси углерода, которая и определяет скорость замещения.

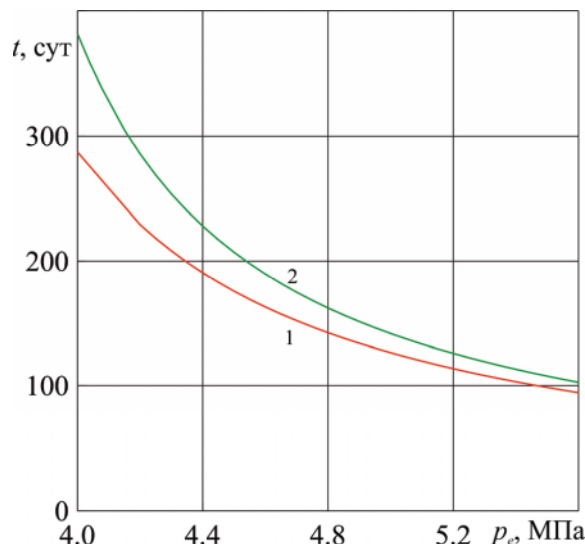


Рис. 7. Зависимость времени полного замещения в газогидрате метана на диоксид углерода во всем пласте от давления закачиваемой двуокиси углерода.  $p_0=3,2 \text{ МПа}$  (кривая 1) и  $3,4 \text{ МПа}$  (кривая 2)

Fig. 7. Time dependence of the total transition in methane hydrate to carbon dioxide hydrate in the entire formation on the pressure of the injected carbon dioxide.  $p_0=3,2 \text{ МПа}$  (curve 1) and  $3,4 \text{ МПа}$  (curve 2)

## Заключение

Предложена математическая модель закачки жидкого диоксида углерода в газогидратный пласт конечной протяженности, сопровождающейся замещением метана на диоксид углерода в газогидрате. Результаты расчетов показали, что при низких значениях давления, под которым закачивается диоксид углерода, а также высоких значениях температуры инжектируемой двуокиси углерода, проницаемости и давления на правой границе пласта величина

на пластовой температуры в области, насыщенной метаном и его газогидратом, может подниматься выше равновесной температуры разложения газогидрата метана. Это соответствует возникновению второй границы фазовых переходов, на которой происходит разложение газогидрата метана на газ и воду, и появлению промежуточной области, насыщенной смесью метана и воды в свободном состоянии.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-20001).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Methane exploitation by carbon dioxide from gas hydrates-phase equilibria for  $\text{CO}_2\text{-CH}_4$  mixed hydrate system / K. Ohgaki, K. Takano, H. Sangawa et al. // Journal of chemical engineering of Japan. – 1996. – V. 29. – P. 478–483.
2. Hirohama A., Shimoyama Yo., Wakabayashi A. Conversion of  $\text{CH}_4$ -hydrate to  $\text{CO}_2$ -hydrate in liquid  $\text{CO}_2$  // Journal of chemical engineering of Japan. – 1996. – V. 29. – № 6. – P. 1014–1020.
3. Recovering methane from solid methane hydrate with carbon dioxide / H. Lee, S. Yongwon, Y.T. Sea et al. // Angewandte Chemie Int. Ed. – 2003. – V. 42. – P. 5048–5051.
4. Lee B.R., Koh C.F., Sum A.K. Quantitative measurement and mechanisms for  $\text{CH}_4$  production from hydrates with the injection of liquid  $\text{CO}_2$  // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2014. – V. 16. – P. 14922–14927.
5. Replacement of  $\text{CH}_4$  in the hydrate by use of liquid  $\text{CO}_2$  / M. Ota, K. Morohashi, Yu. Abe et al. // Energy Conversion and Management. – 2005. – V. 46. – P. 1680–1691.
6. Methane recovery from methane hydrate using pressurized  $\text{CO}_2$  / M. Ota, Yu. Abe, M. Watanabe et al. // Fluid Phase Equilib. – 2005. – V. 229. – P. 553–559.
7. Methane recovery from natural gas hydrate in porous sediment using pressurized liquid  $\text{CO}_2$  / Q. Yuan, C.Y. Sun, B. Liu et al. // Energy Convers. Management. – 2013. – V. 67. – P. 257–264.
8. Determination of appropriate condition on replacing methane from hydrate with carbon dioxide / X.T. Zhou, S.S. Fan, D.Q. Liang et al. // Energy Convers. Management. – 2008. – V. 49. – P. 2124–2129.
9. Recovering methane from solid methane hydrate with carbon dioxide / H. Lee, Y. Seo, Y.T. Seo et al. // Angew Chem. Int. Ed. – 2003. – V. 42. – P. 5048–5051.
10. Goel N. In situ methane hydrate dissociation with carbon dioxide sequestration: current knowledge and issues // J. Petrol Sci Eng. – 2006. – V. 51. – P. 169–184.
11. Replacement of  $\text{CH}_4$  in hydrate in porous sediments with liquid  $\text{CO}_2$  injection / Y. Zhang, L.J. Xiong, X.S. Li et al. // Chem. Eng. Technol. – 2014. – V. 37. – № 12. – P. 2022–2029.
12. Донцов В.Е., Чернов А.А., Донцов Е.В. Ударные волны и образование гидрата углекислого газа при повышенном начальном давлении в газожидкостной среде // Теплофизика и аэромеханика. – 2007. – Т. 14. – № 1. – С. 23–39.
13. Донцов В.Е., Чернов А.А. Процессы растворения и гидратообразования за ударной волной в газожидкостной смеси // Доклады академии наук. – 2009. – Т. 425. – № 6. – С. 764–768.
14. Dontsov V.E., Chernov A.A. Dilution and hydrate forming process in shock waves // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2009. – V. 52. – № 21–22. – P. 4919–4928.
15. Хасанов М.К., Шагапов В.Ш. Разложение газогидрата метана в пористой среде при инъекции теплого углекислого газа // Инженерно-физический журнал. – 2016. – № 5. – С. 1129–1140.
16. Шагапов В.Ш., Хасанов М.К. Режимы восстановления метана из газогидрата при инъекции «теплого» диоксида углерода в пористую среду // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55. – № 5. – С. 753–761.
17. Хасанов М.К. Численное моделирование закачки углекислого газа в истощенное месторождение углеводородов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 8. – С. 48–54.
18. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. – М.: Химия, 1980. – 296 с.
19. Гималтдинов И.К., Хасанов М.К. Математическая модель образования газогидрата при инъекции газа в пласт, частично насыщенный льдом // Прикладная математика и механика. – 2016. – Т. 80. – № 1. – С. 80–90.
20. Шагапов В.Ш., Рафикова Г.Р., Хасанов М.К. К теории образования газогидрата в частично водонасыщенной пористой среде при нагнетании метана // Теплофизика высоких температур. – 2016. – Т. 54. – № 6. – С. 911–920.
21. Musakaev N.G., Borodin S.L. Numerical research of the gas hydrate dissociation to gas and ice in a reservoir during the gas extraction. // MATEC Web of Conferences. – 2017. – V. 115. – № 05003. URL: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/29/mateconf\\_sts2017\\_05003.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/29/mateconf_sts2017_05003.pdf) (дата обращения 11.05.2018).
22. Шагапов В.Ш., Юмагулова Ю.А., Мусакаев Н.Г. Теоретическое исследование предельных режимов гидратообразования при контакте газа и воды // Прикладная механика и техническая физика. – 2017. – Т. 58. – № 2. – С. 3–15.
23. Чиглинцева А.С. Автомодельное решение задачи образования гидрата в снежном массиве // Вычислительная механика сплошных сред. – 2017. – Т. 10. – № 2. – С. 212–224.
24. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Русинов А.А. Теоретическое моделирование процесса извлечения газа из пористого газогидратного пласта, частично насыщенного газом, с учетом теплового взаимодействия с окружающими породами // Теоретические основы химической технологии. – 2016. – Т. 50. – № 4. – С. 452–462.
25. Истомин В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.

Поступила 14.06.2018 г.

#### **Информация об авторах**

**Хасанов М.К.**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной информатики и программирования Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета.

**Столповский М.В.**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета; научный сотрудник Стерлитамакского филиала Башкирского государственного университета.

**Гималтдинов И.К.**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.279.72

## INJECTION OF LIQUID CARBON DIOXIDE IN RESERVOIR SATURATED BY METHANE AND ITS GAS HYDRATE

**Marat K. Khasanov**<sup>1</sup>,  
hasanovmk@mail.ru

**Maxim V. Stolpovskii**<sup>2,1</sup>,  
s\_maxim.pmm@mail.ru

**Ilyas K. Gimaltdinov**<sup>2</sup>,  
iljas\_g@mail.ru

<sup>1</sup> Sterlitamak Branch of the Bashkir State University,  
49, Lenin Avenue, Sterlitamak, 453103, Russia.

<sup>2</sup> Ufa State Petroleum Technical University,  
1, Cosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia

**The relevance** of the study is related to development of theoretical foundations of gas production technologies from gas-hydrate deposits by substitution. The method of carbon dioxide injection is considered, which allows reducing significantly energy costs for development of natural gas hydrate deposits.

**The main aim** of the study is to determine the features of methane replacing with carbon dioxide in gas hydrate when injecting liquid carbon dioxide into gas hydrate formation.

**Object:** a porous layer of finite extent saturated with methane and its gas hydrate, the initial pressure and temperature of which correspond to the conditions of stable existence of methane gas hydrate.

**Methods.** On the basis of the equations of continuum mechanics, a mathematical model of heat and mass transfer in the natural reservoir is constructed, accompanied by methane substitution for carbon dioxide in gas hydrate. It is accepted that in the considered case in a layer there are two characteristic zones separated by a mobile boundary of phase transitions. The first (near) pore area is saturated with liquid carbon dioxide and its gas hydrate, and the second (far) area contains methane and its gas hydrate.

**Result.** The authors have obtained numerical solutions for pressure and temperature fields at injection of liquid carbon dioxide into a gas hydrate layer of finite extent and temperature dependences on the substitution border on injection pressure and formation permeability. It is established that at sufficiently low values of injection pressure and permeability the temperature on the boundary of substitution can rise above the equilibrium temperature of decomposition of methane gas hydrate into gas and water. This corresponds to the emergence of a second mobile interphase boundary at which decomposition of methane gas hydrate occurs. The authors determined the dependence of the maximum temperature of pumped liquid carbon dioxide, above which it is necessary to take into account the formation of a mixture of methane and water, on the pressure values at the right and left borders of the formation and its permeability. It is established that the mode with gas hydrate decomposition is implemented at high pressure values on the right boundary of the formation and low permeability and pressure values under which carbon dioxide is pumped. The authors obtained the dependences of the replacement boundary rate, as well as the time of complete replacement of methane gas hydrate by carbon dioxide gas hydrate in the entire formation, on the pressure on the right and left boundaries of the formation, as well as on its permeability.

### Key words:

Methane hydrate, carbon dioxide, filtration, porous reservoir, replacement

*This work was financially supported by the grant of the Russian Science Foundation (project 17–79–20001).*

### REFERENCES

- Ohgaki K., Takano K., Sangawa H., Matsubara T., Nakano S. Methane exploitation by carbon dioxide from gas hydrates-phase equilibria for CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> mixed hydrate system. *J Chem Eng Japan*, 1996, vol. 29, pp. 478–483.
- Hirohama A., Shimoyama Yo., Wakabayashi A. Conversion of CH<sub>4</sub>-hydrate to CO<sub>2</sub>-hydrate in liquid CO<sub>2</sub>. *Journal of chemical engineering of Japan*, 1996, vol. 29, no. 6, pp. 1014–1020.
- Lee H., Yongwon S., Sea Y.T. Recovering methane from solid methane hydrate with carbon dioxide. *Angewandte Chemie Int. Ed.*, 2003, vol. 42, pp. 5048–5051.
- Lee B.R., Koh C.F., Sum A.K. Quantitative measurement and mechanisms for CH<sub>4</sub> production from hydrates with the injection of liquid CO<sub>2</sub>. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2014, vol. 16, pp. 14922–14927.
- Ota M., Morohashi K., Abe Yu. Replacement of CH<sub>4</sub> in the hydrate by use of liquid CO<sub>2</sub>. *Energy Conversion and Management*, 2005, vol. 46, pp. 1680–1691.
- Ota M., Abe Yu., Watanabe M. Methane recovery from methane hydrate using pressurized CO<sub>2</sub>. *Fluid Phase Equilib.*, 2005, vol. 229, pp. 553–559.
- Yuan Q., Sun C.Y., Liu B. Methane recovery from natural gas hydrate in porous sediment using pressurized liquid CO<sub>2</sub>. *Energy Convers Management*, 2013, vol. 67, pp. 257–264.
- Zhou X.T., Fan S.S., Liang D.Q. Determination of appropriate condition on replacing methane from hydrate with carbon dioxide. *Energy Convers Management*, 2008, vol. 49, pp. 2124–2129.
- Lee H., Seo Y., Seo Y.T. Recovering methane from solid methane hydrate with carbon dioxide. *Angew Chem Int Ed.*, 2003, vol. 42, pp. 5048–5051.
- Goel N. In situ methane hydrate dissociation with carbon dioxide sequestration: current knowledge and issues. *J Petrol Sci Eng.*, 2006, vol. 51, pp. 169–184.
- Zhang Y., Xiong L.J., Li X.S. Replacement of CH<sub>4</sub> in hydrate in porous sediments with liquid CO<sub>2</sub> injection. *Chem Eng Technol.*, 2014, vol. 37, no. 12, pp. 2022–2029.

12. Dontsov V.E., Chernov A.A., Dontsov E.V. Shock waves and formation of carbon dioxide hydrate at an increased pressure in the gas-liquid medium. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2007, vol. 14, no. 1, pp. 21–35. In Rus.
13. Dontsov V.E., Chernov A.A. Dissolution and hydrate-formation processes behind the shock wave in a gas-liquid mixture. *Doklady Physics*, 2009, vol. 54, no. 4, pp. 215–219. In Rus.
14. Dontsov V.E., Chernov A.A. Dilution and hydrate forming process in shock waves. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 52, pp. 4919–4928.
15. Khasanov M.K., Shagapov V.Sh. Methane gas hydrate decomposition in a porous medium upon injection of a warm carbon dioxide gas. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 5, pp. 1123–1133. In Rus.
16. Shagapov V.Sh., Khasanov M.K. Regimes of methane recovery from gas hydrate on injection of «warm» carbon dioxide into a porous medium. *High Temperature*, 2017, vol. 55, no. 5, pp. 737–745. In Rus.
17. Khasanov M.K. Numerical simulation of carbon dioxide injection into a depleted hydrocarbon deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 8, pp. 48–54. In Rus.
18. Byk S.Sh., Makogon Yu.F., Fomina V.I. *Gazovye gidraty* [Gas hydrate]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 296 p.
19. Gimaltdinov I.K., Khasanov M.K. Mathematical model of the formation of a gas hydrate on the injection of gas into a stratum partially saturated with ice, *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, vol. 80, no. 1, pp. 57–64. In Rus.
20. Shagapov V.S., Rafikova G.R., Khasanov M.K. On the theory of formation of gas hydrate in partially water-saturated porous medium when injecting methane. *High Temperature*, 2016, vol. 54, no. 6, pp. 858–866. In Rus.
21. Musakaev N.G., Borodin S.L. Numerical research of the gas hydrate dissociation to gas and ice in a reservoir during the gas extraction. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 115, no. 05003. Available at: [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/29/mateconf\\_sts2017\\_05003.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/29/mateconf_sts2017_05003.pdf) (accessed 11 May 2018).
22. Shagapov V.Sh., Yumagulova Yu.A., Musakaev N.G. Theoretical study of the limiting regimes of hydrate formation during contact of gas and water. *J. of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, vol. 58, no. 2, pp. 189–199. In Rus.
23. Chiglintseva A.S. Self-similar solution of the problem of hydrate formation in snow massifs. *Computational Continuum Mechanics*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 212–224. In Rus.
24. Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Rusinov A.A. Theoretical modeling of gas extraction from a partially gas-saturated porous gas-hydrate reservoir with respect to thermal interactions with surrounding rocks. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, vol. 50, no. 4, pp. 449–458. In Rus.
25. Istomin V.A., Yakushev V.S. *Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh* [Gas Hydrates under Natural Conditions]. Moscow, Nedra Publ., 1992. 236 p.

Received: 14 June 2018.

#### Information about the authors

**Marat K. Khasanov**, Cand. Sc., associate professor, Sterlitamak Branch of the Bashkir State University

**Maxim V. Stolpovskii**, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technical University; researcher, Sterlitamak Branch of the Bashkir State University

**Ilyas K. Gimaltdinov**, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technical University.

УДК 624.139 (571.12)

## ТРАНСФОРМАЦИЯ ПОЧВ СУБАРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ТЮМЕНСКОЙ ОБЛАСТИ НА ЭТАПЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ОСВОЕНИЯ ТЕРРИТОРИИ

Чистякова Нелли Фёдоровна<sup>1</sup>,  
geoeekologiya@mail.ru

Гайнуллина Ирина Николаевна<sup>1</sup>,  
i-r-i-n-a2009@mail.ru

<sup>1</sup> Тюменский государственный университет,  
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью экологического контроля за изменениями почв субарктической зоны Тюменской области на этапе разработки месторождений углеводородного сырья в современных условиях превращения региона в стратегическую ресурсную базу России.

**Цель:** оценка трансформации физического состояния и химического состава почв субарктической зоны Тюменской области под влиянием природных условий и техногенной нагрузки.

**Методы:** ландшафтно-геохимический и статистический, почвенно-геохимические исследования, методы определения химического состава органических и неорганических загрязнителей почв, дешифрирование космоснимков.

**Результаты.** Показано, что под влиянием техногенной нагрузки, начало которой было положено в 1972 г., наиболее устойчивыми к физической трансформации являются синлитогенные почвы пойм, а наименее устойчивыми – постлитогенные почвы, подзолы. Индикатором физической устойчивости почв следует считать структуру почв, определяемую особенностями их образования и преобразования. Химической трансформации (по тяжелым металлам) наиболее подвержены подзолы, а наименее – почвы пойм и органогенные почвы; по органическому веществу – почвы пойм и органогенные почвы соответственно. Индикатор химической устойчивости почв – их способность накапливать, перемещать, отдавать и преобразовывать неорганические и органические загрязнители. Площадь физически трансформированных почв данного участка на этапе промышленного освоения территории, продолжающегося с 1972 г., возросла с 10,734 км<sup>2</sup> (2008 г.) до 11,705 км<sup>2</sup> (2012 г.).

### Ключевые слова:

Субарктическая зона, почвы, техногенез, загрязнение, устойчивость, физическая трансформация, химическая трансформация.

### Введение

Трансформация почв криолитозоны на этапе современного изменения климата и активного промышленного освоения территории является одним из важных процессов, происходящих в настоящее время в субарктической зоне Тюменской области, где интенсивно ведется добыча углеводородного сырья. Повсеместное распространение плоского рельефа, отрицательных среднегодовых температур, многолетнемерзлых пород, переувлажненность почв, слабая испаряемость содержащейся в них влаги привели к активному формированию торфяных и глеевых горизонтов почв. В условиях сезонного промерзания – протаивания почвенного покрова, повторяющегося ежегодно на протяжении сотен лет, на территории изучаемого участка зафиксированы следующие криогенные процессы природного происхождения: морозное пучение, морозобойное растрескивание, термоэрозия, термокарст, эоловая дефляция, заболачивание, которые сопровождаются физическим разрушением структуры почв, приводя к их физической трансформации. Нарушение структуры почв, в свою очередь, влияет на активность миграции химических соединений в сезонно-талом слое; в нарушенные зоны более активно проникают техногенные загрязнители, что сопровождается изменением геохимических характеристик почв, приводя к их химической трансформации. На активизацию эт-

их процессов в пространстве и времени большое влияние оказывает современное промышленное освоение территории – строительство дорог, карьеров, кустовых площадок, шламовых амбаров, опор трубопроводов, линий электропередач и других объектов промышленной инфраструктуры. Бурение скважин, нефтепромысловое обустройство территории и связанная с ними инженерно-хозяйственная деятельность усиливают физическую и химическую трансформацию почв. В Институте наук о Земле Тюменского государственного университета с 2008 по 2012 гг. были проведены геоэкологические исследования на ключевом участке площадью 20 км<sup>2</sup>. Изучаемая территория расположена в зоне избыточного увлажнения северной тайги Тюменской области. Среднегодовая температура воздуха минус 6,5 °С; максимальные температуры воздуха в летнее время +34 °С, минимальные – в зимнее время – минус 61 °С. Зональный тип растительности – сосновые и сосново-лиственничные лесные сообщества, местами редколесные, чаще всего со сфагновым покровом [1]. Около 10 % территории, представляющей собой эрозионно-аккумулятивную равнину с общим наклоном в северо-восточном направлении, заозерено; свыше 50 % заболочено. Территория, дренируемая рекой Пур и её притоками – Пякупур и Янгъягун, в настоящее время опускается. На интенсивное прогибание низменности в плейстоцене указывает широкое ра-

звитие по берегам р. Пур речных террас с абсолютными отметками 45–60 м. Озёрно-аллювиальные отложения, мощностью 5–15 м представлены комплексом отложений зырянской свиты  $Q_{3(2-3)}$ , сложенной переслаиванием песков, супесей и суглинков. Аллювиальные отложения второй надпойменной террасы мощностью 5–10 м (верхний плейстоцен  $Q_{\text{лкр}}$ ) сложены преимущественно песками с преобладанием пылеватой фракции. Современные отложения  $Q_4$  представлены болотными и аллювиальными отложениями. Мощность болотных отложений 1,5–8 м. Для данной территории характерно островное распространение многолетнемерзлых пород, приуроченных к зонам развития торфяников и оторфованных суглинков мощностью 50–150 м на речных долинах и террасах; 200–400 м – в междуречьях; под руслами рек отмечаются сквозные талики. Для эпигенетически промерзших четвертичных суглинков и глин характерны разреживающиеся с глубиной слоистые криогенные текстуры с постепенным уменьшением льдистости вниз по разрезу. Минимальные глубины сезонного промерзания-протаивания сильнольдистых торфов 0,8–1,1 м; максимальные, установленные в слабо увлажнённых песках, – более 3,4 м. Супесчано-суглинистые отложения, в зависимости от их влажности и поверхностных условий, протаивают на глубину 0,8–2,7 м и промерзают на глубину 1–3 м и более. Торф и мох содержат много влаги и их теплопроводность в мерзлом состоянии больше, чем в талом. Зимой они охлаждаются больше, чем прогреваются летом. На оголяемых от снега торфяных буграх происходит образование морозобойных трещин, способствующих разрушению почвенного покрова.

#### Объект и методы изучения

Объектом исследования являются почвы субарктической зоны Тюменской области, которые представляют собой гетерогенную систему, состоящую из твердых, жидких и газообразных неорганических и органических компонентов, обладающих изменчивыми свойствами. Согласно почвенно-географическому районированию России [2], данная территория относится к Нижне-Обской провинции Европееко-Западно-Сибирской таежно-лесной области Бореального пояса с глееподзолистыми почвами, глеезёмами и подзолами северной тайги. Детальная характеристика почв криолитозоны, в том числе геохимическая характеристика для Тюменской области, представлена в работе [3]. На изученном участке выявлены следующие почвы: *дренируемых водоразделов* – подзолы иллювиально-железистые и языковатые (доля которых составляет 36 % от общей площади участка); *органогенные* – торфяные олиготрофные почвы с подтипами: торфяные олиготрофные типичные, торфяные олиготрофные остаточно-эутрофные, торфяные олиготрофные деструктивные (распространены на площади 52,8 % от общей площади участка); *пойм* – аллювиальные торфяно-глее-

вые, аллювиальные слоистые, занимающие 11,2 % всей изучаемой территории.

Иллювиально-железистые подзолы, сформированные под сосновыми кустарничково-лишайниковыми лесами, приурочены к наиболее дренированным, повышенным формам рельефа, на которых хорошо развит поверхностный и боковой внутрипочвенный сток с глубоким залеганием грунтовых вод. Подзолы языковатые встречаются на относительно хорошо дренируемых элементах рельефа с глубиной залегания грунтовых вод не менее 2–2,5 м. В подзолах языковатых содержание гумуса составляет 0,3–0,5 % [3]. Основным источником поступления микроэлементов в почвы – почвообразующие породы, в меньшей степени – почвенно-грунтовые воды и растительный опад.

Торфяные почвы развиваются на водоразделах и верхних террасах речных долин, в условиях затруднённого оттока атмосферных осадков на породах различного гранулометрического состава и сильно кислой реакции при застойном увлажнении атмосферными осадками. Данные почвы обогащены гумусом [4–6]. Формируясь в зоне застойного увлажнения атмосферными водами преимущественно на поверхностях водораздела, эти почвы обеднены марганцем, ванадием, хромом, никелем, кобальтом, цинком, содержащимися ниже кларка [3].

Аллювиальные почвы формируются на низкой и часто затопляемой пойме при регулярном отложении на ее поверхности слоев свежего речного аллювия; торфяно-глеевые – в понижениях центральной поймы. Поступление аллювия приводит к постоянному омоложению субстратов. Среди микроэлементов в почвах пойм изученного участка в концентрациях ниже природных кларков присутствуют: титан, хром, медь, железо и др. [3].

Валовое содержание определяемых в почвах данного участка тяжелых металлов: железо, кадмий, марганец, медь, никель, ртуть, свинец, хром, цинк, определено методом атомно-адсорбционного спектрального анализа. Расчет суммарного показателя загрязнения почв  $Z_c$  проводили по формуле:  $Z_c = \sum (C_i / C_{\phi}) - (n - 1)$ , где  $C_i$  – содержание элемента в образце;  $C_{\phi}$  – фоновое содержание элемента;  $n$  – число суммируемых элементов. В качестве фоновых концентраций приняты средние содержания тяжелых металлов, нефтепродуктов, фенола и хлорид-иона в почвах Тюменской области. Для оценки экологического состояния почв кроме региональных фоновых концентраций загрязнителей использовались величины ПДК и ОДК – для загрязняющих веществ (таблица).

В работе использовались материалы дешифрирования космоснимков (программа SAS Planet), позволившие определить площадь распространения почв различных типов в 2008–2012 гг., по которым была построена карта-схема распространения типов почв и экзогенных геологических процессов природного и техногенного происхождения (рисунок). Площадь исследуемых объектов, опи-

фрованных в программе ArcGis (версия 10.2.1), рассчитывалась с использованием инструмента «вычислить геометрию». Величина погрешности расчетов зависит от масштаба оцифровки, влияющего на соизмеримость формы объекта на карте и в натуральных условиях. Чем больше масштаб оцифровки, тем точнее форма объекта на карте; предельная погрешность 0,1–0,2 мм.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных материалов показал, что в почвах дренируемых водоразделов, заторфованных и заболоченных участков, почвах пойм изучаемого участка развиваются следующие природные криогенные процессы: морозное пучение, морозобойное растрескивание, термоэрозия, термокарст, эоловая дефляция и заболачивание, которые приводят к физической трансформации почв (рисунок).

Заболоченность территории Западной Сибири составляет 42 %, а 73 % этих болот приурочены к криолитозоне [7]. На изучаемом участке общая площадь заболоченных земель составляла в 2008 г. 10,27 км<sup>2</sup> (51,35 % от площади всего изучаемого участка).

Морозное пучение проявляется в сезонно-талом слое при промерзании сильноувлажнённых почв заторфованных и заболоченных участков, что приводит к накоплению льда и сопровождается увеличением их объема [8]. На изучаемом участке образуются сезонные бугры пучения высотой 0,4–0,5 м, которые практически отсутствуют на хорошо дренируемых песках и супесях. Площадь нарушенных торфяных олиготрофных почв в 2008 г. составляла 0,05 км<sup>2</sup> (0,47 % от всей площади почв этого типа), а в 2012 г. она увеличилась до 0,178 км<sup>2</sup> (0,68 % от общей площади почв этого типа на изучаемой территории). Особенностью болотных экосистем криолитозоны с развивающимися там буграми пучения является, с одной стороны, их участие в поглощении углерода из окружающей среды, а с другой – способность выделять в атмосферу парниковые газы: CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> [9, 10]. За период с 2008 по 2012 гг. на фоне небольшого снижения интенсивности морозного пучения отмечается значительный подъём поверхности бугров и торфяников до 30–40 см в год даже в том случае, если очень низкая температура наблюдалась в течение одного месяца и количество осадков было небольшим.

Морозобойное растрескивание, инициируемое температурной деформацией мёрзлых пород в нестационарном температурном поле, сопровождается возникновением напряжений и образованием трещин в многолетнемёрзлых породах и почвах.

Явление зафиксировано на приречных склонах с небольшой мощностью снежного покрова, где распространены подзолы иллювиально-железистые и языковатые. Трещины, образовавшиеся в осенне-зимний период, имеют протяжённость от десятков до сотен метров, а глубину – от 1 м до нескольких метров и располагаются, примерно, на

одинаковом расстоянии друг от друга. Морозобойное растрескивание существенно интенсифицирует развитие оползней, морозного пучения, термокарста, термоэрозии и других криогенных процессов, сопровождаемых физической трансформацией почв и скелета грунтов и пород, приводящей к изменению их объема, рельефа, а значит – к разрушению. В 2008 г. площадь физически трансформированных почв составила 0,10 км<sup>2</sup> (1,28 % от площади всех почв дренируемых водоразделов); в 2012 г. – 0,24 км<sup>2</sup> (3,33 % от всей площади этих почв на изучаемом участке).

Термоэрозия зафиксирована в почвах пойм на участках распространения аллювиальных торфяно-глеевых и аллювиальных слоистых почв. Площадь распространения термоэрозии в 2008 г. составляла 0,015 км<sup>2</sup> (0,67 % от всей площади почв пойм), а в 2012 г. 0,027 км<sup>2</sup> (2,36 % от всей площади почв пойм на изученной территории). В 2012 г. появились новые территории с термоэрозионными процессами техногенного генезиса, площадь которых увеличилась по сравнению с 2008 г. на 1,69 %.

Термокарст – просадки поверхности Земли, которые формируются в отрицательных формах рельефа. На изучаемом участке зафиксирован на торфяно-олиготрофных почвах и их подтипах: типичных, торфяных олиготрофных остаточо-эутрофных, торфяных олиготрофных деструктивных, приуроченных к зонам островного распространения многолетнемёрзлых пород. Площадь почв, подверженных термокарсту в 2008 г., составляла 0,22 км<sup>2</sup> (2,08 % от всей площади почв заторфованных и заболоченных участков), а в 2012 г. – 0,25 км<sup>2</sup> (2,36 % от площади этих почв на участке).

Площадь песчаных раздувов за пятилетний период выросла с 0,079 до 0,32 км<sup>2</sup>, что составляет 3,35 % от площади подзолов на изученной территории. На активизацию процессов эоловой дефляции и других криогенных процессов влияют техногенные факторы, сопровождающие обустройство месторождения углеводородного сырья: строительство трасс, линий электропередач, автодорог, трубопроводов, буровых площадок, песчаных карьеров. Увеличение площадей физически трансформированных почв субарктической зоны Тюменской области тесно связано с промышленным освоением данной территории. Вследствие механического нарушения целостности напочвенных покровов в период поисково-разведочных и эксплуатационных работ, изменения их структуры и условий снегонакопления, увлажнения почв наиболее распространенным явлением стало увеличение глубины сезонного протаивания почв под влиянием антропогенного и техногенного воздействия на территориях распространения площадных и линейных объектов, дорожного полотна, насыпки под трубопроводы, что влияет на нарушение поверхностного стока и приводит к подъёму уровня грунтовых вод.



подвергшихся физической трансформации в период с 2008 по 2012 гг. увеличилась на 8,29 %. Среди геодинамических критериев, используемых для оценки развития природных и техногенных геологических процессов, можно использовать площадные критерии [11]. С учетом отношения площади, на которой зафиксирован трансформированный рельеф, к общей площади конкретных типов почв можно говорить о том, что все почвы изучаемой территории в настоящее время находятся в «условно удовлетворительном» эколого-геологическом состоянии.

Ежегодное повторение циклов промерзания-протаивания почв, приводящее к интенсификации физической трансформации под влиянием природных и техногенных факторов, сопровождается химическим загрязнением, проявляющимся

в накоплении неорганических и органических загрязнителей, нехарактерных для этих почв. Наиболее типичными загрязнителями в нефтегазодобывающих районах являются: буровой раствор, нефть, нефтепродукты, микроэлементы – тяжелые металлы; хлориды [12–16]. Из 22 пунктов экологического мониторинга, расположенных на изучаемой территории, три находятся вне зоны влияния технических объектов и являются фоновыми [17]. Геохимический состав всех типов почв территории характеризуется дефицитом микроэлементов [3]. В процессе добычи углеводородного сырья в почвы поступают тяжелые металлы, хлориды и органические соединения, генетически связанные с углеводородным сырьем, пластовыми водами и хозяйственной деятельностью человека [18, 19].



Условные обозначения/Legend

Признаком активного антропогенного воздействия на почвы является увеличение рН до уровня щелочной среды [20]. В пробах изученных почв три точки (ПК-6, ПК-22, ПК-10) характеризуются сильно кислой средой (рН меньше 5). Кислая среда установлена в почвах точек наблюдения (ПК-5, ПК-8, ПК-7, ПК-13, ПК-16, ПК-17, ПК-20); в остальных пробах почв, в т. ч. ПФ-19 и ПФ-12 (фоновые точки), среда близка к нейтральной (рН больше 6). Значения рН, превышающие 7, вероятно, отражают общее химическое загрязнение территории нефтегазодобычи, обусловленное деятельностью соседних недропользователей и длительным сроком освоения недр субарктической зоны Тюменской области [12]. В числе определяемых микроэлементов только марганец, цинк и никель в отдельных точках определены в концентрациях, превышающих ПДК, ОДК, фон [21–24].

Марганец, относящийся к третьему классу опасности, определен в концентрациях 13,4–151 мг/кг. В почвах пойм среднее содержание марганца составляет 38,4 мг/кг, в подзолах – 56,35 мг/кг. Наибольшая концентрация марганца установлена в точках, расположенных вблизи техногенных объектов (ПК-4 – в 2,3 превышает фон, но меньше ПДК; ПК-7 – в 2,6 больше фона). Наименьшее содержание марганца установлено в органогенных почвах – в среднем, 31,5 мг/кг.

Никель – элемент второго класса опасности, наибольшие концентрации которого (средние значения 4,55 и 4,16 мг/кг) установлены в подзолах и органогенных почвах соответственно. Минимальные содержания никеля определены в почвах пойм (2,8 мг/кг). Ни в одной пробе содержание никеля не превышает фоновых концентраций.

Цинк – элемент третьего класса опасности, определен во всех пробах почв. В ПК-9 и ПК-3 его концентрации в 1,4 и в 1,3 раза соответственно превышают ПДК. Среднее содержание цинка в подзолах 40,2 мг/кг, в органогенных почвах – 22,7 мг/кг, а в почвах пойм – 10,4 мг/кг.

Наибольшее содержание ионов хлора, превышающее фон в 2,6 раза, определено в органогенных почвах (ПФ-17), что объясняется разливом пластовых вод на почвы через некачественную запорную арматуру эксплуатационных скважин соседней территории. Среднее содержание хлоридов в почвах этого типа 75,4 мг/кг. Наименьшее содержание (среднее значение 30,3 мг/кг) установлено в почвах пойм. В подзолах наибольшее содержание хлоридов равно 86,3 мг/кг (ПК-6). Среднее содержание хлоридов в подзолах 48 мг/кг. В остальных точках опробования содержание хлоридов ниже фоновых значений.

Кроме неорганических соединений в почвах изучаемого участка определены органические загрязнители: фенол и нефтепродукты [25, 26]. Содержание фенола, обнаруженного во всех пробах почв, изменяется от 1 до 103 мг/кг, на фоновых пунктах – 4,5–60,8 мг/кг. Повышенные концентрации фенола, превышающие фон, установлены в

ПК-22 (в 1,7 раза), ПК-6 (в 3,9 раза), ПК-10 (в 4,3 раза), ПФ-17 (в 2,5 раз), где он вносится в почвы с хозяйственно-бытовыми стоками.

Нефтепродукты по характеру воздействия на любые почвы существенно отличаются от тяжелых металлов, т. к. они представляют собой сложную смесь углеводородных и неуглеводородных соединений алкановой, нафтенной и ароматической структур. Многие соединения ароматической структуры по отношению к биоте являются канцерогенными. Содержание нефтепродуктов, оцениваемое по шкале нормирования Ю.И. Пиковского, изменяется в почвах изучаемой территории от <5 до 605,2 мг/кг. Среднее фоновое содержание в почвах Тюменской области, равное 42 мг/кг, превышено в двух фоновых пунктах: ПФ-19 (в 1,7 раза), ПФ-12 (в 1,2 раза), что можно объяснить общим повышением химического загрязнения почв территории нефтегазодобычи северных районов Тюменской области [12, 17]. Среднее содержание нефтепродуктов в подзолах – 119 мг/кг, в почвах пойм – 160 мг/кг, в органогенных почвах – 48,2 мг/кг. В ПК-2, рядом с которой сконцентрировано несколько объектов промышленной инфраструктуры, их содержание в почвах превышает в 14,4 раза фоновое. Зоны повышенного загрязнения почв нефтепродуктами связаны с такими объектами, как: кусты скважин, ДНС, УКПГ, факелы и др. технологические объекты.

Расчет суммарного показателя загрязнения почв органическими и неорганическими соединениями ( $Z_c$ ) показал, что почвы большинства пунктов опробования относятся к «допустимой» категории загрязнения ( $Z_c$  меньше 8). Участки «слабой» категории загрязнения – в точке ПК-3, ПК-10; «средней» – в точке ПК-2, «сильной» – в точках ПК-6 и ПК-22.

Максимальное полиэлементное (за счет тяжелых металлов) техногенное загрязнение установлено в подзолах (ПК-6, ПК-22), минимальное – в почвах пойм и торфяных олиготрофных почвах. Точки опробования с повышенным уровнем химического загрязнения находятся наиболее близко к техногенным объектам.

Почвы дренируемых водоразделов, заторфованных и заболоченных участков и почвы пойм, сформированные в зонах холодного и очень холодного температурного режима, обладают умеренной скоростью разложения углеводов и достаточно активным их рассеиванием [27]. Миграцию и рассеивание продуктов химического загрязнения преимущественно по латерали обеспечивают торфяные олиготрофные почвы, а по вертикали и латерали – супесчаные и песчаные аллювиальные торфяно-глеевые почвы пойм с промывным водным режимом. Скорости разложения и рассеивания соединений нефтяного ряда, а также их спутников – солей тяжелых металлов, поверхностно-активных веществ, закачиваемых в недра для повышения нефтеотдачи, определяют устойчивость почв и влияют на потенциал их самоочищения. На

**Таблица.** Результаты химического анализа почв

**Table.** Results of chemical analysis of soils

| Превышения ПДК, ОДК, фоновых содержаний в почвах ТО                                                                                               |       |               |                 |                 |                   |       |       |                                     |       |       |                                          |                                           |                                            |                                        |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------|-------|-------------------------------------|-------|-------|------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|-------|
| Exceeding the maximum permissible concentrations, approximately permissible concentrations, background contents in the soils of the Tyumen region |       |               |                 |                 |                   |       |       |                                     |       |       |                                          |                                           |                                            |                                        |       |
| Загрязняющее вещество<br>Contaminant                                                                                                              | pH    | Cl            | NO <sub>3</sub> | NH <sub>4</sub> | Фенолы<br>Phenols | НП    | Cr    | Cu                                  | Fe    | Mn    | Ni                                       | Pb                                        | Zn                                         | Cd                                     | Zc    |
|                                                                                                                                                   | Ед.рН | мг/кг (mg/kg) |                 |                 |                   |       |       |                                     |       |       |                                          |                                           |                                            |                                        |       |
| Подзол иллювиально-железистый/Podzol illuvial-ferruginous                                                                                         |       |               |                 |                 |                   |       |       |                                     |       |       |                                          |                                           |                                            |                                        |       |
| ПДК, ОДК<br>Maximum permissible concentrations, approximately permissible concentrations                                                          | –     | –             | 130             | –               | –                 | –     | 0,05  | 33                                  | –     | 1500  | 20                                       | 32                                        | 55                                         | 0,5                                    | –     |
| Фоновое содержание в почвах ТО<br>Background content in the soils of the Tyumen region                                                            | –     | 54,2          | 18,23           | 1,58            | 24,20             | 42    | 31    | 5,1                                 | 3926  | 58,7  | 5,9                                      | 6,5                                       | 19,7                                       | 0,8                                    | –     |
| ПК-5/ПК-5                                                                                                                                         | 5,51  | 12,1          | 0,51            | 1,51            | 1,24              | 50,6  | 6,66  | 1,95                                | 1864  | 34,1  | 2,45                                     | 4,04                                      | 10,80                                      | 0,13                                   | 1,2   |
| ПК-8/ПК-8                                                                                                                                         | 5,65  | 12,4          | 0,51            | 1,56            | 8,47              | 32,7  | 5,64  | 4,83                                | 2489  | 23,6  | 2,37                                     | 3,61                                      | 18,20                                      | 0,11                                   | 0     |
| ПК-9/ПК-9                                                                                                                                         | 6,73  | 13,5          | <0,226          | 0,66            | 1,52              | 93,7  | 2,00  | 1,32                                | 750   | 28,9  | 1,32                                     | 3,31                                      | 76,52                                      | 0,07                                   | 5,1   |
| ПК-20/ПК-20                                                                                                                                       | 5,97  | 11,0          | <0,226          | 5,30            | 11,6              | 10,4  | 7,37  | 1,55                                | 2358  | 43,6  | 2,67                                     | 4,94                                      | 8,25                                       | 0,10                                   | 3,35  |
| ПК-21/ПК-21                                                                                                                                       | 6,19  | 9,9           | <0,226          | 4,99            | 10,6              | 128   | 1,90  | 1,20                                | 851   | 29,7  | 1,38                                     | 2,44                                      | 8,26                                       | 0,09                                   | 5,19  |
| ПК-22/ПК-22                                                                                                                                       | 4,50  | 59,3          | 3,62            | 48,10           | 41,9              | 132   | 2,75  | 3,64                                | 534   | 16,8  | 8,22                                     | 6,56                                      | 12,90                                      | 0,26                                   | 33,8  |
| Подзол языковатый/Tongued podzol                                                                                                                  |       |               |                 |                 |                   |       |       |                                     |       |       |                                          |                                           |                                            |                                        |       |
| ПДК, ОДК<br>Maximum permissible concentrations, approximately permissible concentrations                                                          | –     | –             | 130             | –               | –                 | –     | 0,05  | 33                                  | –     | 1500  | 20                                       | 32                                        | 55                                         | 0,5                                    | –     |
| Фоновое содержание в почвах ТО<br>Background content in soils of the Tyumen region                                                                | –     | –             | –               | –               | –                 | –     | 31    | 5,1                                 | 3926  | 58,7  | 5,9                                      | 6,5                                       | 19,7                                       | 0,8                                    | –     |
| ПК-1/ПК-5                                                                                                                                         | 6,55  | 12,4          | 0,52            | 0,63            | <1,0              | 164   | 2,65  | 1,07                                | 1029  | 35,5  | 1,34                                     | 3,16                                      | 9,71                                       | 0,14                                   | 3,9   |
| ПК-2/ПК-2                                                                                                                                         | 6,23  | 39,4          | 4,65            | 12,50           | 10,80             | 605,2 | 2,89  | 1,42                                | 962   | 13,4  | 2,25                                     | 2,48                                      | 9,23                                       | 0,11                                   | 21,3  |
| ПК-3/ПК-3                                                                                                                                         | 6,48  | 11,7          | <0,226          | 0,66            | 6,22              | 134   | 16,3  | 3,18                                | 12815 | 84,4  | 4,25                                     | 6,80                                      | 70,20                                      | 0,64                                   | 10,57 |
| ПК-4/ПК-4                                                                                                                                         | 6,21  | 11,4          | 0,50            | 1,34            | 1,46              | 13,2  | 10,9  | 1,89                                | 4842  | 135,0 | 4,34                                     | 3,70                                      | 8,03                                       | 0,26                                   | 1,84  |
| ПК-6/ПК-6                                                                                                                                         | 4,93  | 86,3          | 18,70           | 77,90           | 93,6              | 383   | 5,90  | 4,76                                | 5083  | 51,7  | 7,26                                     | 5,96                                      | 35,20                                      | 0,32                                   | 65,7  |
| ПК-7/ПК-7                                                                                                                                         | 5,77  | 13,8          | <0,226          | 1,99            | 6,40              | 11,8  | 26,80 | 4,44                                | 10735 | 151,0 | 7,30                                     | 7,09                                      | 20,90                                      | 0,56                                   | 6,43  |
| ПК-11/ПК-11                                                                                                                                       | 6,39  | 9,2           | <0,226          | 0,30            | 8,4               | 89,8  | 7,28  | 1,45                                | 3648  | 28,4  | 2,55                                     | 4,70                                      | 5,96                                       | 0,18                                   | 2,64  |
| ПК-13/ПК-13                                                                                                                                       | 5,73  | 9,9           | <0,226          | 0,86            | 3,0               | 47,2  | 1,88  | 1,90                                | 955   | 34,9  | 1,68                                     | 8,45                                      | 11,30                                      | 0,11                                   | 2,76  |
| ПК-14/ПК-14                                                                                                                                       | 6,34  | 9,9           | <0,226          | 0,58            | 5,0               | 123   | 4,65  | 1,20                                | 4693  | 43,2  | 1,88                                     | 4,41                                      | 17,30                                      | 0,20                                   | 3,63  |
| ПК-15/ПК-15                                                                                                                                       | 6,61  | 7,1           | <0,226          | 1,09            | 6,4               | 63    | 10,40 | 2,08                                | 5043  | 53,0  | 3,48                                     | 5,46                                      | 19,80                                      | 0,16                                   | 2,93  |
| Аллювиальные слоистые/Floodplain                                                                                                                  |       |               |                 |                 |                   |       |       |                                     |       |       |                                          |                                           |                                            |                                        |       |
| ПДК, ОДК<br>Maximum permissible concentrations, approximately permissible concentrations                                                          | –     | –             | 130             | –               | –                 | –     | 0,05  | 33                                  | –     | 1500  | 20                                       | 32                                        | 55                                         | 0,5                                    | –     |
| Фоновое содержание в почвах ТО<br>Background content in the soils of the Tyumen region                                                            | –     | 54,2          | 18,23           | 1,58            | 24,20             | 42    | 16,4  | 5,7                                 | 3926  | 241   | 3                                        | 3,2                                       | 15,3                                       | 1,7                                    | –     |
| ПФ-19/ПФ-19                                                                                                                                       | 6,58  | 11,7          | 0,51            | 15,00           | 7,4               | 72,2  | 4,76  | 1,34                                | 1849  | 25,9  | 2,70                                     | 3,52                                      | 7,41                                       | 0,12                                   | 0     |
| Аллювиальные торфяно-глейные/Alluvial peat-gley                                                                                                   |       |               |                 |                 |                   |       |       |                                     |       |       |                                          |                                           |                                            |                                        |       |
| ПК-10/ПК-10                                                                                                                                       | 4,78  | 49,0          | 3,12            | 16,10           | 103               | 248   | 6,62  | 2,37                                | 2691  | 51,0  | 3,01                                     | 6,59                                      | 13,40                                      | 0,13                                   | 10,2  |
| Торфяные олиготрофные/Peat oligotrophic (organogenic soils)                                                                                       |       |               |                 |                 |                   |       |       |                                     |       |       |                                          |                                           |                                            |                                        |       |
| ПДК<br>Maximum permissible concentrations                                                                                                         | –     | –             | 130             | –               | –                 | –     | 0,05  | При рН<br><5,5–66<br>рН<br>>5,5–132 | –     | 1500  | При рН<br><5,5– 40,0<br>рН<br>>5,5– 80,0 | При рН<br><5,5– 65,0<br>рН<br>>5,5– 130,0 | При рН<br><5,5– 110,0<br>рН<br>>5,5– 220,0 | При рН<br><5,5– 1,0<br>рН<br>>5,5– 2,0 | –     |
| Фоновое содержание в почвах ТО<br>Background content in the soils of the Tyumen region                                                            | –     | 54,2          | 18,23           | 1,58            | 24,20             | 42    | 49,2  | 21,9                                | 3926  | 350   | 15,8                                     | 9,3                                       | 44,1                                       | 2,7                                    | –     |
| ПФ-12/ПФ-12                                                                                                                                       | 6,30  | 9,9           | <0,226          | 0,98            | 4,5               | 48,8  | 11,90 | 3,80                                | 9321  | 35,7  | 3,90                                     | 4,90                                      | 8,55                                       | 0,36                                   | 0     |
| ПК-16/ПК-16                                                                                                                                       | 5,37  | 58,2          | 3,89            | 20,10           | 42,2              | <5,0  | 2,17  | 2,81                                | 1171  | 10,1  | 3,71                                     | 5,30                                      | 36,91                                      | 0,28                                   | 1,74  |
| ПФ-17/ПФ-17                                                                                                                                       | 5,60  | 141,0         | 3,99            | 23,70           | 60,8              | <5,0  | 2,03  | 2,63                                | 608   | 6,7   | 4,85                                     | 4,60                                      | 27,50                                      | 0,17                                   | 0     |
| ПК-18/ПК-18                                                                                                                                       | 6,73  | 20,9          | <0,226          | 0,24            | 6,2               | 134   | 6,99  | 2,05                                | 2840  | 55,6  | 3,47                                     | 3,96                                      | 11,30                                      | 0,18                                   | 2,19  |

увеличение миграционной активности химических элементов в почвах оказывают влияние те органические вещества, которые образуются в результате разложения растительных остатков в почвах, способных затем образовывать новые органоминеральные комплексы. Почвы пойм с исходно более высоким содержанием гумуса и активным современным гумусообразованием характеризуются содержанием тяжелых металлов в концентрациях ниже ПДК, фона, кларка; содержанием хлоридов (в отдельных пробах) ниже фона, содержаниями нефтепродуктов и фенола в 2 раза превышающими фон.

Следовательно, эти почвы, обладая высокой активностью переноса неорганических соединений в форме органоминеральных комплексов (что делает их слабо химически трансформированными), характеризуются большими глубинами проникновения органических загрязнителей, накапливают нефтепродукты и фенол, что обуславливает высокую химическую трансформацию почв пойм. Возможно также перераспределение нефтяных загрязнителей между почвами пойм и других типов в результате внутрипочвенной миграции органических веществ в направлении стока поверхностных и грунтовых вод.

Способность почв к самоочищению в большой степени определяется также наличием в их среде селективных микроорганизмов, разлагающих неорганические и органические вещества на более простые компоненты, которые включаются в общий круговорот вещества [28–32]. Нарушение сохранности почвенно-растительного покрова (физическая трансформация) изменяет условия обитания микроорганизмов и их видовое разнообразие в почвах, обеспечивающих самоочищение почв от химических загрязнений органического и неорганического происхождения. Наличие разложившихся растительных остатков биологического субстрата для жизнедеятельности микроорганизмов благоприятно влияет на микробиологическую продуктивность почв. Наличие бактерий и других микроорганизмов, ассоциированных с гумусовым веществом почв, появляющихся в почвах в качестве ответной реакции на их загрязнение, обеспечивает возможность биохимического разложения химических загрязнителей различной природы. Наиболее высокое содержание органического вещества, в том числе образующегося при разложении растительных остатков, установлено в органогенных почвах, что и обеспечивает возможность высокого биохимического разложения неорганических и органических химических загрязнителей, мигрирующих в почвах на расстояния, удаленные от источника загрязнения. В них содержится минимальная концентрация органических загрязнителей: нефтепродуктов и фенола, ионов хлора, а среди тяжелых металлов – только цинк превышает фон, в то время как марганец и никель ниже фона,

ПДК и кларка, что позволяет считать их слабо химически трансформированными.

### Заключение

Все типы почв субарктической зоны на данном участке, в той или иной степени, уязвимы по отношению к физическому и химическому техногенному воздействию. Наибольшая площадь физической трансформации почв на участке добычи углеводородного сырья под влиянием техногенных нагрузок зафиксирована, практически в равных масштабах, в подзолах (5,4 % от общей площади этих почв на участке) и органогенных почвах (5,3 % от общей площади этих почв на участке), где широко распространены многолетнемерзлые породы с небольшой мощностью верхнего слоя 0–10 м, быстро деградирующие в слое сезонного промерзания – протаивания. Наиболее устойчивы к физической трансформации в этих условиях почвы пойм (0,54 % трансформированных почв от их площади на участке), почвообразование которых происходит одновременно с аккумуляцией свежего минерального материала, поступление которого приводит к постоянному омолаживанию субстрата и росту почвенного профиля вверх. Индикатор физической устойчивости почв при техногенном воздействии – особенность их формирования и структура.

Химическая трансформация почв на данном участке дифференцирована по неорганическим и органическим техногенным загрязнителям. Наиболее химически трансформированы (по неорганическим загрязнителям) подзолы, наименее – почвы пойм. Между ними расположены органогенные почвы. Наиболее высокие концентрации химических загрязнителей установлены вблизи источников техногенного загрязнения. Чем больше физическая трансформация почв и ниже содержание гумуса, тем больше их химическая трансформация по неорганическим загрязнителям. Наиболее химически трансформированы (по органическим загрязнителям нефтяного происхождения) почвы пойм, а наименее – органогенные почвы. Индикатором химической устойчивости почв при техногенном воздействии является их способность накапливать, перемещать, отдавать и преобразовывать неорганические и органические загрязнители, попавшие в них из окружающей среды как извне, так и с почвенными водами. Миграционная подвижность загрязнителей разной природы в почвах зависит от структуры, температуры и влажности почв; содержания загрязнителей, степени и скорости их преобразования, формы нахождения в почвах, обогащенности почв разложившимися растительными остатками, способными образовывать новые органоминеральные комплексы в определенной кислотно-щелочной среде. На специфическую физическую и химическую устойчивость почв существенное влияние оказывает наличие многолетнемерзлых пород и почв.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузин И.Л. Геоморфология Западно-Сибирской равнины. – СПб.: Изд-во Государственной полярной академии, 2005. – 176 с.
2. Национальный атлас почв Российской Федерации. – М.: Астрель: АСТ, 2011. – 632 с.
3. Хренов В.Я. Почвы криолитозоны Западной Сибири: морфология, физико-химические свойства, геохимия. – Новосибирск: Наука, 2011. – 211 с.
4. Строение и свойства почв многолетнемерзлых торфяников юго-востока Большеземельской тундры / Д.А. Каверин, А.В. Пастухов, Е.М. Лаптева, К. Биазы, М. Марущак, П. Мартикайнен // Почвоведение. – 2016. – № 5. – С. 542–556.
5. Пастухов А.В., Каверин Д.А. Экологическое состояние мерзлотных бугристых торфяников на северо-востоке европейской России // Экология. – 2016. – № 1. – С. 1–9.
6. Körschens M. Die abhängigkeit der organischen bodensubstanz von standort faktoren und acker- und pflanzenbaulichen massnahmen, ihre beziehungen zu Bodeneigenschaften und Ertrag sowie abbau von ersten Bodenfruchtbarkeitskennziffern für den Gehalt des Bodens. DDR. Dissertation. – Berlin, 1980. – 157 p.
7. Гарагуля Л.С., Гордеева Г.И., Оспенников Е.Н. Роль геокриологических процессов в формировании и динамике криолитозоны // Криосфера Земли. – 2012. – Т. XVI. – № 4. – С. 31–41.
8. Пономарева О.Е., Гравис А.Г., Бердников Н.М. Современная динамика бугров пучения и плоскоугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири (на примере Надымского стационара) // Криосфера Земли. – 2012. – Т. XVI. – № 4. – С. 21–30.
9. Динамика развития бугристых торфяников на южной границе Восточно-Европейской криолитозоны / А.В. Пастухов, Т.И. Марченко-Варагова, Д.А. Каверин, С.П. Кулижский, О.Л. Кузнецов, В.С. Панов // Почвоведение. – 2017. – № 3. – С. 1–14.
10. A combined biogeochemical and paleobotanical approach to study permafrost environments and past dynamics / T. Ronkainen, M. Väliranta, E. McClymont, C. Biasi, S. Salonen, S. Fontana, E. Tuittila // J. Quaternary Science. – 2015. – V. 30. – P. 189–200.
11. Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г. Экологическая геология. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2002. – 415 с.
12. Московченко В.Д. Экогеохимия нефтегазодобывающих районов Западной Сибири. – Новосибирск: Гео, 2013. – 259 с.
13. Golovatskaya E.A., Dzykarev E.A. Carbon budget of oligotrophic mire sites in the southern taiga of Western Siberia // Plant and Soil. – 2009. – № 315. – P. 19–34.
14. McGill W.B., Rowell M.J. Determination of oil content of oil contaminated. Soil // Science. Total Environment. – 1980. – V. 14. – № 3. – P. 245–253.
15. Хаустов А.П., Редина М.М. Геохимические маркеры на основе соотношений концентраций ПАУ в нефти и нефтезагрязненных объектах // Геохимия. – 2017. – № 1. – С. 57–67.
16. Углеродное состояние почв при разновозрастном нефтяном загрязнении / А.Н. Геннадиев, Ю.И. Пиковский, Р.Г. Ковач, Т.С. Кошовский, Н.И. Хлынина // Почвоведение. – 2016. – № 5. – С. 574–583.
17. Солнцева Н.П. Добыча нефти и геохимия природных ландшафтов. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – 376 с.
18. Сысо А.И. Общие закономерности распределения микроэлементов в покровных отложениях и почвах Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. – 2004. – № 3. – С. 273–287.
19. Содержание тяжёлых металлов в почвах с различным уровнем антропогенной нагрузки на территории Курской области / Н.П. Неведров, А.Л. Белоконов, С.А. Анненков, А.А. Проценко, Е.П. Проценко, Н.А. Балабина, А.В. Пученкова // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. – 2015. – № 3(200). – Вып. 30. – С. 117–125.
20. Ponnamperna F.N. The chemistry of Submerged soils // Advan Argon. – 1972. – V. 24. – P. 29–36.
21. Перельман А.И. Геохимия. – М.: Высшая школа, 1989. – 528 с.
22. Brummer G., Herms U. Influence of soil reaction and organic matter on the solubility of heavy metals in soils // Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems / Eds. B. Ulrich, J. Pankrath. – 1983. – P. 233–243. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-6983-4\\_18](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-6983-4_18) (дата обращения 01.06.2018).
23. Lovley D.R. Dissimilatory metal reduction // Annual Review Microbiology. – 1993. – V. 47. – P. 263–270.
24. Karathanasis A.D. Mineral controls in colloid-mediated transport of metals in soil environments // Geochemical and Hydrological Reactivity of Heavy Metals in Soils. – Boca Raton, Fla.: Lewis Publishers, 2003. – 360 p.
25. Углеродное состояние почв фоновых таежных ландшафтов (юго-западная часть Устьянского плато) / А.Н. Геннадиев, Ю.И. Пиковский, М.А. Смирнова, А.П. Жидкин, Р.Г. Ковач // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2016. – № 3. – С. 90–97.
26. Водорастворимые органические кислоты торфяных мерзлотных почв юго-востока Большеземельской тундры / Е.В. Шамрикова, Д.А. Каверин, А.В. Пастухов, Е.М. Лаптева, О.С. Кубик, В.В. Пунегов // Почвоведение. – 2015. – № 3. – С. 288–295.
27. Пиковский Ю.И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. – М.: Изд-во Московского государственного университета, 1993. – 208 с.
28. The structure of resin bacterial population in soil permafrost / V.S. Soina, A.L. Mulyukin, E.V. Demkina, E.A. Vorobyova, G.J. El-Registan // Astrobiology. – 2004. – V. 4. – P. 435–458.
29. Bae H.C., Cota-Robles E.H., Casida L.E. Microflora of soil as viewed by transmission electron microscopy // Application Microbiology. – 1972. – V. 23. – № 3. – P. 637–643.
30. Casida L.E. Observation of microorganisms in soil and other habitats // Application Microbiology. – 1969. – V. 18. – P. 65–71.
31. Roszak D.B., Colwell R.R. Survival strategies of bacteria in the natural environment // Microbiology. Review. – 1987. – V. 51. – P. 367–369.
32. Microbial Populations in Antarctic Permafrost: Biodiversity, State, Age and Implication for Astrobiology / D.A. Gilichinsky, G.S. Wilson, E.I. Friedmann, C.P. McKay, R.S. Sletten, E.M. Rivkina, T.A. Vishnivetskaya, L.G. Erokhina, N.E. Ivanushkina, G.A. Kochkina, V.A. Shcherbakova, V.S. Soina, E.V. Spirina, E.A. Vorobyova, D.G. Fyodorov-Davydov, B. Hallet, S.M. Ozeretskaya, V.A. Sorokovikov, K.S. Laurinavichyus, A.V. Shatilovich, J.P. Chanton, V.E. Ostroumov, J.M. Tiedje // Astrobiology. – 2007. – V. 7. – P. 275–311.

Поступила 08.06.2018 г.

## Информация об авторах

**Чистякова Н.Ф.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии Института наук о Земле Тюменского государственного университета.

**Гайнуллина И.Н.**, инженер НИИ «Экология и рациональное использование природных ресурсов» Тюменского государственного университета.

UDK 624.139(571.12)

## TRANSFORMATION OF SOILS OF SUBARCTIC ZONE IN TYUMEN REGION AT THE STAGE OF INDUSTRIAL DEVELOPMENT OF THE TERRITORY

Nelli F. Chistyakova<sup>1</sup>,  
geookologiya@mail.ru

Irina N. Gaynullina<sup>1</sup>,  
i-r-i-n-a2009@mail.ru

<sup>1</sup> Tyumen State University,  
6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russia.

*The relevance of the research is related to the need for environmental monitoring of subarctic zone soils change in the Tyumen region at the stage of developing hydrocarbon deposits in modern conditions of transformation of the region into strategic base of Russia.*

**The aim** of the research is to evaluate the transformation of physical state and chemical composition of soils in subarctic zone of the Tyumen region under the influence of natural conditions and technogenic stress.

**Methods:** landscape-geochemical and statistical, soil-geochemical studies, methods for determining chemical composition of organic and inorganic pollutants of soils, decoding of space images.

**Results.** It is shown, that under the influence of anthropogenic load, which began in 1972, synlitogenic soils of floodplain are the most resistant to physical transformation and post-lithogenic soils – podzols – are the least resistant. The structure of soils, determined by the features of their formation and transformation should be considered the indicator of physical stability of soils. Podzols are the most susceptible to chemical transformations (on heavy metals), and floodplain soils and organogenic soils are the least susceptible; on organic matter – the soils of floodplains and organogenic soils, respectively. The indicator of chemical stability of soils is their ability to accumulate, move, release and transform inorganic and organic contamination. The area of physically transformed soils of this site at the stage of industrial development of the territory since 1972 has increased from 10,734 km<sup>2</sup> (2008) to 11,705 km<sup>2</sup> (2012).

### Key words:

Subarctic zone, soils, technogenesis, contamination, stability, physical transformation, chemical transformation.

### REFERENCE

1. Kuzin I.L. *Geomorfologiya Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Geomorphology of the West Siberian Plain]. St-Petersburg, State Polar Academy Publ. house, 2005. 176 p.
2. *Natsionalny atlas pochv Rossiyskoy Federatsii* [National Atlas of Soils of the Russian Federation]. Moscow, Astrel: AST Publ., 2011. 632 p.
3. Khrenov V.Ya. *Pochvy kriolitozony Zapadnoy Sibiri: morfologiya, fiziko-khimicheskie svoystva, geokhimiya* [Soils of the cryolithozone of Western Siberia: morphology, physico-chemical properties, geochemistry]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2011. 211 p.
4. Kaverin D.A., Pastukhov A.B., Lapteva E.M., Biazzi K., Maruschak M., Martikainen P. Structure and properties of soils of perennial and friable peat bogs of the Southeast of the Bolshezemelskaya tundra. *Pedology*, 2016, no. 5, pp. 542–556. In Rus.
5. Pastukhov A.V., Kaverin D.A. Ecological condition of permafrost hilly peatlands in the northeast of European Russia. *Ecology*, 2016, no. 1, pp. 1–9. In Rus.
6. Körschens M. *Die abhangigkeit der organischen bodensubstanz von standort faktoren und acker-und planzenbaulichen massnahmen, ihre Beziehungen zu Bodeneigenschaften und Ertrag sowie abbaitung von ersten Bodenfruchtbarkeitskennziffern für den Gehalt des Bodens*. DDR Dissertation [The abandonment of the organic soil subbstanty of standort factors and field and planning measures, their accusations of soil properties and yield, and the completion of First soil fertility indicators for the content of the bath know. Dr. Diss.]. Berlin, 1980. 157 p.
7. Garagulya L.S., Gordeeva G.I., Ospennikov E.N. The role of geocryological processes in the formation and dynamics of cryolithozone. *Cryosphere of the Earth*, 2012, vol. XVI, no. 4, pp. 31–41. In Rus.
8. Ponomareva O.E., Grivis A.G., Berdnikov N.M. Modern dynamics of swelling and flattened peat bogs in the northern taiga of Western Siberia (by the example of the Nadym hospital). *Cryosphere of the Earth*, 2012, vol. XVI, no. 4, pp. 21–30. In Rus.
9. Pastukhov A.V., Marchenko-Vagapova T.I., Kaverin D.A., Kulizhsky S.P., Kuznetsov O.L., Panov V.S. Dynamics of development of hummocky peat bogs on the southern boundary of the East European cryolithozone. *Pedology*, 2017, no. 3, pp. 1–14. In Rus.
10. Ronkainen T., Välranta M., McClymont E., Biasi C., Salonen S., Fontana S., Tuittila E. A combined biogeochemical and paleobotanical approach to study permafrost environments and past dynamics. *J. Quaternary Science*, 2015, vol. 30, pp. 189–200.
11. Trofimov V.T., Zilling D.G. *Ekologicheskaya geologiya* [Ecological geology]. Moscow, ZAO «Geoinformmark» Publ, 2002. 415 p.
12. Moskovchenko V.D. *Ekogeokhimiya neftegazodobyvayushchikh rayonov Zapadnoy Sibiri* [Ecogeochemistry of oil and gas producing regions of Western Siberia]. Novosibirsk, Geo Publ., 2013. 259 p.
13. Chaustov A.A., Duykarev E.A. Carbon budget of oligotrophic mire sites in the southern taiga of Western Siberia. *Plant and Soil*, 2009, no. 315, pp. 19–34.
14. McGill W.B., Rowell M.J. Determination of oil content of oil contaminated. *Soil. Sci. Total Environ.*, 1980, vol. 14, no. 3, pp. 245–253.
15. Chaustov A.P., Redina M.M. Geochemical markers on the basis of the ratios of PAH concentrations in oil and non-oil contaminated objects. *Geochemistry*, 2017, no. 1, pp. 57–67. In Rus.
16. Gennadiev A.N., Pikovski Yu.I., Kovach R.G., Koshovski T.C., Khlynina N.I. Hydrocarbon condition of soils in the process of oil contaminated. *Pedology*, 2016, no. 5, pp. 574–583. In Rus.
17. Solntseva N.P. *Dobycha nefi i geokhimiya prirodnykh landshaftov* [Extraction of oil and geochemistry of natural landscapes]. Moscow, Moscow State University Press, 1998. 376 p.
18. Syso A.I. Obshchie zakonomernosti raspredeleniya mikroelementov v pokrovnykh otlozheniyakh i pochvakh Zapadnoy Sibiri [General regularities of distribution of trace elements in the cover sediments and soils of Western Siberia]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal*, 2004, no. 3, pp. 273–287.

19. Nevédov N.P., Belokon A.L., Annenkov S.A., Protsenko A.A., Protsenko E.P., Balabina N.A., Puchenkova A.V. The content of heavy metals in soils with different levels of anthropogenic load in the territory of the Kursk region. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye nauki – Scientific statements of Belgorod state University. Series: Natural Sciences*, 2015, no. 3 (200), Iss. 30, pp. 117–125. In Rus.
20. Ponnampereuma F.N. The chemistry of Submerged soils. *Advan. Argon*, 1972, vol. 24, pp. 29–36.
21. Perelman A.I. *Geokhimiya* [Geochemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1989. 528 p.
22. Brummer G., Herms U. Influence of soil reaction and organic matter on the solubility of heavy metals in soils. *Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems*. Eds. B. Ulrich, J. Pankrath., 1983. pp. 233–243. Available at: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-6983-4\\_18](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-6983-4_18) (accessed 1 June 2018).
23. Lovley D. R. Dissimilatory metal reduction. *Annual Review Microbiology*, 1993, vol. 47, pp. 263–270.
24. Karathanasis A.D. Mineral controls in colloid-mediated transport of metals in soil environments. *Geochemical and Hydrological Reactivity of Heavy Metals in Soils*. Boca Raton, Fla., Lewis Publ., 2003. 360 p.
25. Gennadiyev A.N., Pkovsky Yu.I., Smirnova M.A., Zhidkin A.P., Kovach R.G. Hydrocarbon state of soils of the background taiga landscapes (southwestern part of the Ustyansky plateau. *Bulletin of the Moscow University, Ser. 5, Geography*, 2016, no. 3, pp. 90–97. In Rus.
26. Shamrikova E.V., Kaverin D.A., Pastukhov A.V., Lapteva E.M., Kubik O.S., Punegov V.V. Water-soluble organic acids of peaty permafrost soils of the southeast of the Bolshezemelskaya tundra. *Pedology*, 2015, no. 3, pp. 288–295. In Rus
27. Pkovsky Yu.I. *Prirodnye i tekhnogennye potoki uglevodorodov v okruzhayushchey srede* [Natural and technogenic flows of hydrocarbons in the environment]. Moscow, Moscow State University Press, 1993. 208 p.
28. Soina V.S., Mulyukin A.L., Demkina E.V., Vorobyova E.A., El-Registan G.J. The structure of resing bacterial population in soil permafrost. *Astrobiology*, 2004, vol. 4, pp. 435–458.
29. Bae H.C., Cota-Robles E.H., Casida L.E. Microflora of soil as viewed by transmission electron microscopy. *Application Microbiology*, 1972, vol. 23, no. 3, pp. 637–643.
30. Casida L.E. Observation of microorganisms in soil and other habitats. *Application Microbiology*, 1969, vol. 18, pp. 65–71.
31. Roszak D.B., Colwell R.R. Survival strategies of bacteria in the natural environment. *Microbiology. Review*, 1987, vol. 51, pp. 367–369.
32. Gilichinsky D.A., Wilson G.S., Friedmann E.I., Mckay C.P., Sletten R.S., Rivkina E.M., Vishnivetskaya T.A., Erokhina L.G., Ivanushkina N.E., Kochkina G.A., Shcherbakova V.A., Soina V.S., Spirina E.V., Vorobyova E.A., Fyodorov-Davydov D.G., Hallet B., Ozerskaya S.M., Sorokovikov V.A., Laurinavichyus K.S., Shatilovich A.V., Chanton J.P., Ostroumov V.E., Tiedje J.M. Microbial Populations in Antarctic Permafrost: Biodiversity, State, Age and Implication for Astrobiology. *Asrobiology*, 2007, vol. 7, pp. 275–311.

Received: 8 June 2018.

#### Information about the authors

**Nelli F. Chistyakova**, Dr. Sc., professor, Tyumen State University.

**Irina N. Gaynullina**, engineer, Tyumen State University.

УДК 551.510.532; 551.501.816

## ЛИДАР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОЗОНА В АТМОСФЕРЕ

Долгий Сергей Иванович<sup>1</sup>,  
dolgii@iao.ru

Невзоров Алексей Алексеевич<sup>1</sup>,  
naa@iao.ru

Невзоров Алексей Викторович<sup>1</sup>,  
nevzorov@iao.ru

Романовский Олег Анатольевич<sup>1,2</sup>,  
roa@iao.ru

Харченко Ольга Викторовна<sup>1</sup>,  
olya@iao.ru

<sup>1</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук,  
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.

<sup>2</sup> Национального исследовательского Томского государственного университета,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Одним из основных климатообразующих факторов с точки зрения радиационного баланса атмосферы являются парниковые газы, прежде всего озон и газовые составляющие озоновых циклов. В настоящее время оперативную информацию об их вертикальном распределении в атмосфере можно получать только с использованием средств дистанционного зондирования, в том числе лазерного зондирования (лидаров), что определяет актуальность и научную значимость данной научной и технической проблемы.

**Цель:** разработка лидара для исследований вертикального распределения озона в верхней тропосфере–стратосфере в высотном диапазоне ~ (5–45) км на длинах волн 299/341 и 308/353 нм в сопоставлении со спутниковыми измерениями.

**Методы:** метод дифференциального поглощения и рассеяния.

**Результаты.** Представлен лидар для измерения вертикального распределения озона над городом Томск (56,5 с.ш.; 85,0 в.д.). Лидарное зондирование озона производилось на парах длин волн 299/341 и 308/353 нм. Используемые длины волн позволяют проводить мониторинг вертикальной стратификации озона в пределах верхней тропосферы–стратосферы. Результаты лидарного зондирования озона по данным января 2018 г. приведены в сравнении с данными спутников IASI/MetOp и AURA, а также с среднеширотной моделью Крюгера. Отличие лидарных профилей озона от модельных является естественными для динамики озонового слоя в различные дни наблюдений. Большие различия вертикального распределения озона в значениях по данным лидара и спутника MetOp на высотах стратосферы объясняются необходимостью коррекции априорной модели в алгоритме восстановления спутниковых данных.

**Вывод.** Создан лидар для измерения озоновых профилей в верхней тропосфере–стратосфере. Он позволяет восстанавливать вертикальное распределение озона в высотном диапазоне ~ (5–45) км на длинах волн 299/341 и 308/353 нм.

### Ключевые слова:

Лидар, озон, атмосфера, дифференциальное поглощение, спутник MetOp, спутник AURA.

### Введение

В настоящее время представляется актуальным рассмотрение вопросов техники и технологии прогнозирования состояния озонового слоя атмосферы, представляющего собой ценный георесурс, незаменимый для обеспечения комфортного состояния окружающей среды и решения проблем климатологии планеты.

Одним из основных климатообразующих факторов с точки зрения радиационного баланса атмосферы являются парниковые газы, прежде всего озон и газовые составляющие озоновых циклов. Изучение газового состава атмосферы без применения дистанционных технологий представляется весьма затруднительным. В настоящее время оперативную информацию о вертикальном распределении газовых компонент в атмосфере можно получать только с использованием средств дистанционного зондирования,

что определяет актуальность и научную значимость данной научной и технической проблемы.

Среди дистанционных технологий важное место занимают лазерные методы зондирования, разрабатываемые с момента изобретения лазера в 1961 г. Лидары (лазерные локаторы) используют различные эффекты взаимодействия световых импульсов с атмосферной средой и показали высокую эффективность при определении физических характеристик (температура, давление, ветер), а также содержания газовых примесей от поверхности земли до высот 80–100 км [1–10]. При этом возможности лидаров обеспечивают изучение атмосферных процессов в масштабах от нескольких километров до глобальных с многолетними рядами данных.

В настоящее время лазерное зондирование озоносферы приобрело регулярный характер [10–18].

**Таблица 1.** Лидарные комплексы для измерения вертикального распределения озона

**Table 1.** Lidar complexes for measuring ozone vertical distribution (OVD)

| Станция<br>Station         | Лазер<br>Laser                    | Длина волн, нм<br>Wavelength, nm | БКР<br>SRS                                      | Пары длин волн, нм<br>Wavelength pairs, nm          | Диапазон высот, км<br>Altitude range, km | Ошибки<br>Errors, % | Зеркало, м<br>Mirror, m    | Источник<br>Links |
|----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------|----------------------------|-------------------|
| Цукуба<br>Tsukuba          | Nd: YAG<br>XeCl<br>Nd: YAG<br>XeF | 266<br>308<br>355<br>351         | CO <sub>2</sub><br>D <sub>2</sub>               | 276/287<br>287/299<br>308/355<br>308/351<br>308/339 | 0,4–3<br>3–10<br>15–45<br>10–45<br>10–45 | 3–9<br>5–30         | 0,25<br>0,6<br>1<br>1<br>2 | [10, 11]          |
| Верхний<br>Прованс<br>ОНР  | Nd: YAG<br>XeCl<br>Nd: YAG        | 266<br>308<br>355                | D <sub>2</sub><br>–                             | 289/316<br>308/355                                  | 3–14<br>15–45                            | 10<br>5–20          | 0,4<br>4 шт.<br>0,53       | [12, 13]          |
| Столовая гора<br>TMF       | Nd: YAG<br>XeCl<br>Nd: YAG        | 266<br>308<br>355                | D <sub>2</sub><br>H <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | 289/299<br>308/353                                  | 3–18<br>15–50                            | 7–14<br>5–30        | 0,91<br>0,9                | [14, 15]          |
| ЦКП им. Годдарда<br>GSFC   | Nd: YAG<br>XeCl<br>Nd: YAG        | 266<br>308<br>355                | D <sub>2</sub><br>H <sub>2</sub><br>–           | 289/299<br>308/355                                  | 1,5–12<br>10–50                          | 16–19<br>5–30       | 0,45<br>0,76               | [16, 17]          |
| Владивосток<br>Vladivostok | XeCl                              | 308                              | H <sub>2</sub>                                  | 308/353/331                                         | 5–40                                     | 2–30                | 0,6                        | [18]              |

В табл. 1 представлены основные характеристики лидарных комплексов для следующих станций: Tsukuba (36.05° с.ш., 140.13° в.д.), Япония [10, 11]; Observatoire de Haute Provence (ОНР) (43.94° с.ш., 5.71° в.д.), Франция [12, 13]; Table Mountain Facility (TMF) (34.4° с.ш., 117.7° з.д.), США [14, 15]; Goddard Space Flight Center (GSFC) или Центр космических полетов имени Годдарда (ЦКП им. Годдарда) (37.1° с.ш., 76.39° з.д.), США [16, 17]; Владивосток (43.3° с.ш., 132° в.д.), Россия [18].

Натурные эксперименты в стратосфере на Сибирской лидарной станции (СЛС) [5] (г. Томск: 56,5° с.ш.; 85,0° в.д.) показали, что при применении пары длин волн 308/353 нм максимальная высота потолка зондирования стратосферы достигает ~40–45 км (озоновый максимум в Томске расположен в высотном интервале 19–21 км), учитывая, что нижняя граница зондирования составляет 15 км [19].

На СЛС также проводится лидарное зондирование озона в верхней тропосфере–нижней стратосфере на паре длин волн 299/341 нм. Эксперименты показали, что при применении этих длин волн охват высот составляет ~6–15 км [20], а в удачных случаях охват высот достигает диапазона ~5–20 км.

Целью данной работы является создание лидара для измерения вертикального распределения озона (ВРО) в верхней тропосфере–стратосфере в высотном диапазоне ~ (5–45) км на длинах волн 299/341 и 308/353 нм в сопоставлении со спутниковыми измерениями. Лидар для измерений озона в диапазоне высот 5–45 км позволит выявлять изменчивость ВРО в верхней тропосфере–стратосфере, где озон играет роль пассивного трассера циркуляционных процессов, и на высотах выше велопаузы (~26 км), где поведение озоносферы определяется фотохимическими процессами.

## Аппаратура

Для расширения возможностей изучения особенностей ВРО в верхней тропосфере–стратосфере, особенно в области локализации озонового слоя, и отслеживания его сезонной изменчивости модернизирован и введен в режим регулярных измерений лидар для измерений ВРО в высотном диапазоне ~ (5–45) км на длинах волн 299/341 и 308/353 нм. Попеременное лидарное зондирование озоносферы на парах длин волн 299/341 и 308/353 нм позволяет охватить в наиболее удачных измерениях диапазон высот от ~5 до ~45 км.

На рис. 1 представлена блок-схема созданного лидара для зондирования озона в верхней тропосфере–стратосфере.

Основные технические характеристики лазерных источников и приемных оптических элементов лидарной системы:

|                                   |                          |         |
|-----------------------------------|--------------------------|---------|
| Передатчик                        | Nd: YAG                  | XeCl    |
| Длина волны зондирования, λ нм    | 299/341                  | 308/353 |
| Энергия импульса, мДж (соотв. λ)  | 25/20                    | 100/50  |
| Частота следования, Гц (соотв. λ) | 15                       | 100     |
| Расходимость, мрад                | 0,1–0,3                  | 0,1–0,3 |
| Приемник                          | Телескоп системы Ньютона |         |
| Диаметр зеркала, м                | 0,5                      |         |
| Фокусное расстояние, м            | 1,5                      |         |

В качестве источников излучения лидарной системы для зондирования озона в верхней тропосфере – нижней стратосферы используется Nd: YAG-лазер – модель LS-2134UT Минской фирмы «LOTIS TP», работающий на длине волны 266 нм. Для измерений стратосферного озона используется эксимерный XeCl лазер LPX-120i фирмы «Lambda Physik», работающий на длине волны 308 нм. Излучения лазеров, проходя через ячейки БКР преобразования, попадают на автоматизированные поворотные зеркала (ПЗ), которые управ-

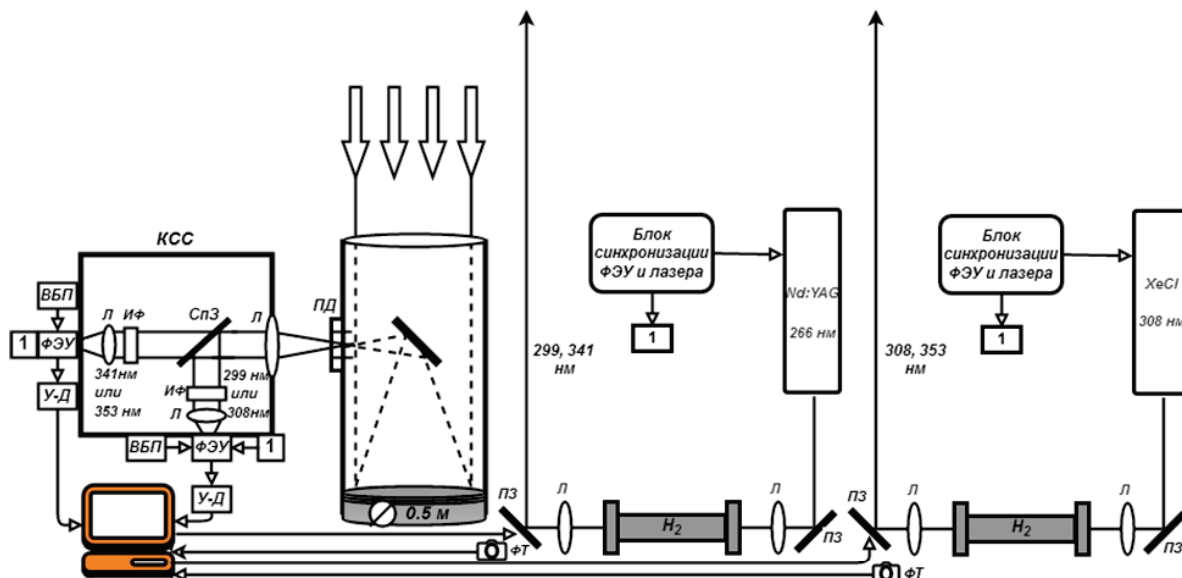


Рис. 1. Блок-схема озонового лидара: ПД – полевая диафрагма; КСС – кювета спектральной селекции с ФЭУ; СпЗ – спектроделительное зеркало; УД – усилители-дискриминаторы; ВБП – высоковольтные блоки питания; ПЗ – поворотные зеркала; Л – линзы; КСС – кювета спектральной селекции; ИФ – интерференционные фильтры; ФТ – фототранзистор

Fig. 1. Block diagram of the ozone lidar: ПД (FD) – field diaphragm; КСС (CSS) – cell of spectral selection with a photomultiplier; СпЗ (SM) – spectrodeliver mirror; УД (AD) – amplifiers-discriminators; ВБП (HVPS) – high-voltage power supplies; ПЗ (RM) – rotary mirrors; Л (L) – lenses; ИФ (IF) – interferential filters; ФТ (FT) – phototransistor

вляются от компьютера и выводятся в атмосферу. Прием оптических сигналов ведется на телескоп с диаметром зеркала 0,5 м. После телескопа оптическое излучение попадает в кювету спектральной селекции (КСС), где происходит выделение по длинам волн зондирования.

Для тропосферных измерений используется оптика, работающая на длинах волн 299/341 нм, для стратосферных – 308/353 нм, соответственно. Далее оптическое излучение фокусируется линзами (Л) на фотоэлектронные умножители (ФЭУ) R7207-01 фирмы HAMAMATSU, работающие в режиме счета импульсов фототока. Чтобы устранить искажения, обусловленные обратно-рассеянными сигналами высокой интенсивности от ближней зоны зондирования или облаков, блоки ФЭУ оснащены электронным управлением коэффициента усиления. Электрические сигналы с ФЭУ поступают на усилители-дискриминаторы (УД), где происходит их усиление и формирование импульсов до уровней +5 вольт. Сформированные электрические сигналы с УД поступают на соответствующие каналы регистратора импульсов (счетчик фотонов), который осуществляет накопление и запись лидарных сигналов в цифровом виде на жесткий диск компьютера. Время измерения стратосферного озона составляет ~30–40 минут. Перенастройка приемника для регистрирования другой пары длин волн примерно ~1–5 минут. Время измерения озона на паре 299/341 нм составляет ~40 минут. Обработка результатов измерений проводится с помощью методики восстановления лидарных профилей ВРО с учетом температурной и аэрозольной коррекции.

Результаты лидарных измерений сопоставлялись с результатами измерений, полученными с помощью микроволнового радиометра MLS, установленного на борту метеорологического спутника AURA, а также интерферометра IASI, установленного на борту метеорологического спутника MetOpt.

Микроволновой радиометр MLS, производящий мониторинг атмосферных составляющих BrO, CH<sub>3</sub>Cl, CO, ClO, HCl, HNO<sub>3</sub>, HO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub> и др., а также профилей температуры и влажности в стратосфере в рамках американской программы NASA Earth Observing System, расположен на борту американского научно-исследовательского спутника AURA. Используются стандартные озоновые продукты данных (240 ГГц излучение), восстановленные с использованием 4,2 версии алгоритма обработки данных, которые свободно публикуются [21, 22].

Интерферометр IASI расположен на борту метеорологического спутника Европейского космического агентства (MetOp), ведущего измерения атмосферных составляющих CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO, O<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub>, а также профилей температуры и влажности в тропосфере и нижней стратосфере в рамках европейской программы European Polar System в режиме, близком к режиму реального времени. IASI обеспечивает получение спектров высокого радиометрического качества с разрешением 0,5 см<sup>-1</sup> в диапазоне от 625 до 2760 см<sup>-1</sup> [23]. Восстановление профилей озона по данным спутникового зондирования выполняется в диапазоне 1025–1075 см<sup>-1</sup>.

Спутниковые данные IASI получены с помощью станции приема спутниковой информации 2,4 XLB фирмы Orbital Systems (США), введенной

в эксплуатацию в ИОА СО РАН в 2011 г. [20]. Спутниковые данные MLS находятся в свободном доступе на сайте NASA [22]. Получаемая информация позволяет проводить сравнение спутниковых данных с результатами лидарного зондирования на СЛС.

#### Методика измерений и анализ ошибок

Наиболее чувствительным из методов, используемых для определения пространственного распределения концентрации какого-либо атмосферного газа, в том числе и озона, является метод дифференциального поглощения (МДП или DIAL). В основу методики восстановления лидарных профилей ВРО с учетом температурной и аэрозольной коррекции легло уравнение [24]:

$$n(H) = \frac{1}{2[k_{on}(H) - k_{off}(H)]} \times \left\{ \underbrace{\frac{d}{dH} \ln \left[ \frac{N_{off}(H)}{N_{on}(H)} \right]}_B - \underbrace{\frac{d}{dH} \ln \left[ \frac{\beta_{off}^a(H) + \beta_{off}^m(H)}{\beta_{on}^a(H) + \beta_{on}^m(H)} \right]}_C - \underbrace{2[\alpha_{off}^a(H) - \alpha_{on}^a(H)] - 2[\alpha_{off}^m(H) - \alpha_{on}^m(H)]}_D \right\}, \quad (1)$$

где  $N(H)$  – зарегистрированный эхо-сигнал в линии поглощения – *on* и вне линии поглощения – *off*;  $\alpha^a$  – коэффициент ослабления аэрозольного рассеяния;  $\beta^a$  – коэффициент обратного аэрозольного рассеяния;  $k$  – коэффициент поглощения;  $n(H)$  – концентрация озона.

Реальные вариации температуры в атмосфере могут вызвать существенные изменения в априорном расчете коэффициента поглощения озона, что приводит к систематическим ошибкам восстановления профилей ВРО. Поэтому в алгоритме восстановления ВРО целесообразно проводить коррекцию на температурную зависимость  $k_{on}(H, T)$ ,  $k_{off}(H, T)$ . В предложенной нами методике использована зависимость сечения поглощения озона от температуры, полученная по последним экспериментальным и расчетным данным из работ [25, 26]. Эта зависимость представлена в табл. 2.

При больших значениях аэрозольного наполнения атмосферы обратное аэрозольное рассеяние в несколько раз превышает молекулярное, что при неучтенных рассеивающих и ослабляющих свой-

ствах атмосферы на зондирующих длинах волн дает существенные искажения восстановленного озонного профиля [27]. В алгоритме расчета ВРО (1) аэрозольная коррекция учитывается в выражениях  $C$  и  $D$  введением реального распределения отношения рассеяния  $R_{off}(H)$ , в то время как в обычной «невозмущенной» атмосфере расчет ВРО можно проводить при значениях  $R_{off}(H)=1$ .

На СЛС проведен большой ряд измерений ВРО с учетом аэрозольной и температурной коррекций. Для сопоставления спутниковых и лидарных данных важно учитывать вертикальное распределение их ошибок. Ошибка восстановления ВРО из лидарных измерений рассчитывается по следующей формуле:

$$E_{ums}^2 = e_1^2 + e_2^2 + e_3^2,$$

где  $e_1$  – неточность сечения поглощения;  $e_2$  – среднеквадратическая ошибка лидарного измерения в режиме счета фотонов;  $e_3$  – погрешность восстановления отношения рассеяния. Для сечения поглощения взят квадрат ошибки его измерения, равный сумме квадратов систематической и предела статистической ошибки, раскрытые в работе [25], который соответствует квадрату числа 3,26 %.

Среднеквадратическая ошибка лидарного измерения в режиме счета фотонов:

$$e_2^2 = 0,25 \left[ \frac{1}{N_{on}(H)} + \frac{1}{N_{off}(H)} \right].$$

Формула погрешности восстановления отношения рассеяния имеет вид

$$e_3^2 = \frac{N_{off}(H)}{[N_{off}(H) - N_{noise}(H)]^2} + \frac{N_{off}(H_{calib})}{[N_{off}(H_{calib}) - N_{noise}(H_{calib})]^2} + K,$$

где  $H_{calib}$  – высота калибровки;  $N_{noise}$  – постоянная величина,  $K$  – величина, появляющаяся вследствие предположений методики обработки и оцениваемая величина 3·(0,01)<sup>2</sup>.

В работе используются более актуальные коэффициенты поглощения с большим числом температурных точек по сравнению с ранними работами. Отличие применения нового и старого набора сечения поглощения представлено в виде восстановленных профилей на рис. 2.

Таблица 2. Сечения поглощения озона (см<sup>2</sup>) для диапазона 193–293 К на длинах волн зондирования озона [25, 26]

Table 2. Ozone absorption cross sections (cm<sup>2</sup>) for the range of 193–293 K at the wavelengths of ozone sounding [25, 26]

| Длина волны, нм<br>Wavelength, nm | Температура/Temperature, K |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |
|-----------------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                   | 193                        | 203                    | 213                    | 223                    | 233                    | 243                    | 253                    | 263                    | 273                    | 283                    | 293                    |
| На линии поглощения/Online        |                            |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |
| 299                               | 4,12·10 <sup>-19</sup>     | 4,15·10 <sup>-19</sup> | 4,25·10 <sup>-19</sup> | 4,15·10 <sup>-19</sup> | 4,3·10 <sup>-19</sup>  | 4,25·10 <sup>-19</sup> | 4,36·10 <sup>-19</sup> | 4,36·10 <sup>-19</sup> | 4,38·10 <sup>-19</sup> | 4,46·10 <sup>-19</sup> | 4,58·10 <sup>-19</sup> |
| 308                               | 1,13·10 <sup>-19</sup>     | 1,14·10 <sup>-19</sup> | 1,16·10 <sup>-19</sup> | 1,17·10 <sup>-19</sup> | 1,18·10 <sup>-19</sup> | 1,19·10 <sup>-19</sup> | 1,24·10 <sup>-19</sup> | 1,25·10 <sup>-19</sup> | 1,28·10 <sup>-19</sup> | 1,31·10 <sup>-19</sup> | 1,35·10 <sup>-19</sup> |
| Вне линии поглощения/Offline      |                            |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |                        |
| 341                               | 5,62·10 <sup>-22</sup>     | 5,94·10 <sup>-22</sup> | 6,1·10 <sup>-22</sup>  | 6,95·10 <sup>-22</sup> | 7,05·10 <sup>-22</sup> | 7,59·10 <sup>-22</sup> | 8,15·10 <sup>-22</sup> | 8,9·10 <sup>-22</sup>  | 9,9·10 <sup>-22</sup>  | 1,08·10 <sup>-21</sup> | 1,15·10 <sup>-21</sup> |
| 353                               | 4,95·10 <sup>-23</sup>     | 6,4·10 <sup>-23</sup>  | 7,25·10 <sup>-23</sup> | 8,88·10 <sup>-23</sup> | 9,57·10 <sup>-23</sup> | 1,1·10 <sup>-22</sup>  | 1,27·10 <sup>-22</sup> | 1,45·10 <sup>-22</sup> | 1,67·10 <sup>-22</sup> | 2,02·10 <sup>-22</sup> | 2,38·10 <sup>-22</sup> |

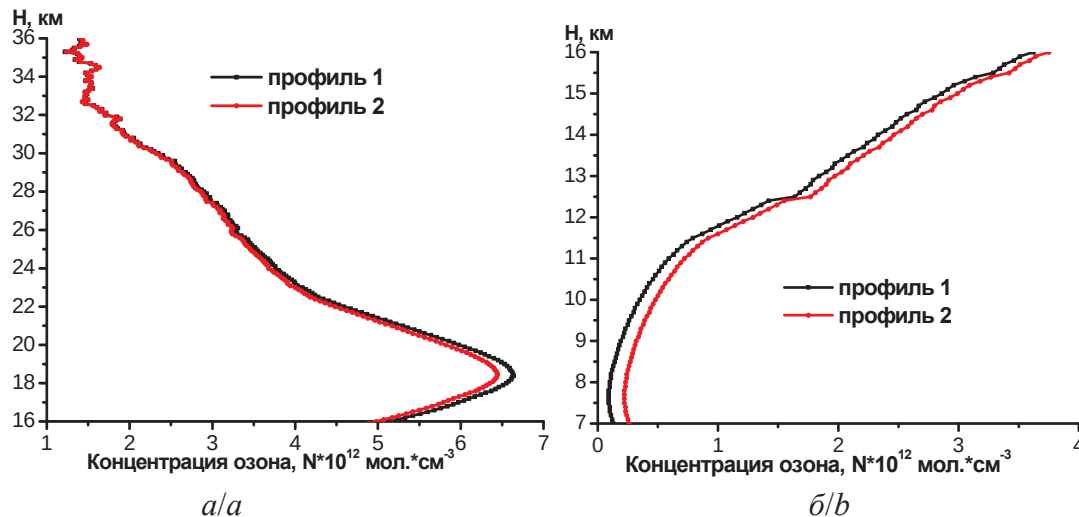


Рис. 2. Сопоставление профилей озона: а) ВРО стратосферы за 10.03.2017 г.; б) ВРО верхней тропосферы – нижней стратосферы за 21.12.2017 г.

Fig. 2. Comparison of ozone profiles: a) stratosphere OVD for 10.03.2017; b) upper troposphere – lower stratosphere OVD for 21.12.2017

Профиль 1 на рис. 2 соответствует восстановленному профилю озона с использованием новых коэффициентов поглощения по работам [25, 26], профиль 2 относится к более ранним работам [28, 29].

#### Результаты сопоставления лидарных профилей со спутниковыми данными

За январь 2018 г. на станции лидарного зондирования ИОА СО РАН получили 18 измерений стратосферного ВРО, также получили 18 измерений верхней тропосферы – нижней стратосферы во второй половине года. Наиболее удачные 14 измерений представлены в этой работе. Используя представленную выше методику, рассчитывались восстановленные профили озона стратосферы и верхней тропосферы – нижней стратосферы. Они сопоставляются с некоторыми профилями, полученными с помощью интерферометра IASI, установленного на борту метеорологического спутника MetOpt, а также с микроволновым радиометром MLS, установленного на борту метеорологического спутника AURA. Координаты и время лидарного и спутникового зондирования приведены в табл. 3, 4. Лидарные измерения озона над городом Томск проводились в вечернее и ночное время в условиях безоблачного неба.

Все профили ВРО приведены в сравнении с моделью Крюгера [30]. Стратосферные измерения озона представлены в виде трех кривых: восстановленный лидарный профиль, AURA профиль и модель Крюгера. Из рис. 3, а видно, что профили, восстановленные из лидарных и спутниковых данных, совпадают с небольшими отклонениями на протяжении всего слоя измерений. Отклонения обусловлены разницей между пространственным разрешением лидара (100 м) и спутника AURA (1,3 км и больше), соответственно количество точек, формирующих ВРО, больше у лидара, что так-

же влияет на поведение кривой восстановленного ВРО.

Измерения приведены к общему высотному диапазону 16–38 км для более удобного сравнения всех профилей. Из рис. 3, а видно, что для всего периода наблюдений прослеживается в ряде измерений завышение концентраций озона AURA по сравнению с данными лидара в диапазоне от 22 до 38 км.

Из анализа натурных данных стратосферного ВРО за весь рассматриваемый период 2018 г., которые представлены на рис. 3, можно сделать следующие выводы. Незначительная разница между профилями концентраций (рис. 3, а, б), полученными на лидаре и AURA, присутствует в начале и на хвосте высотной шкалы. Вследствие этого средняя разность (Лидар-AURA), или отклонение, по всем дням измерений в концентрациях озона изменяется от  $-0,54 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> на высоте 24,6 км до  $0,14 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> на 17,5 км (рис. 3, б). Максимальное по всем профилям отклонение составляет от  $-0,33 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> на высоте 26,3 км до  $1,54 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> на 16 км. Минимальное отклонение также по всем профилям изменяется от  $-1,68 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> на 16 км до  $-0,36 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> на высоте 35 км.

Поскольку озон имеет заметный ход, то для того, чтобы найти относительные погрешности его измерения прибором MLS (AURA), разность концентраций нормировали на значения, полученные лидаром:  $100 \cdot (\text{Лидар} - \text{AURA}) / \text{Лидар}$ . Эти данные представлены на рис. 3, в, из которого видно, что средняя относительная разность положительна в диапазоне высот 16,5...19,2 км, где достигает 2,35 % на 17,9 км.

Средняя относительная разность отрицательна в диапазоне высот 16...16,4 и 19,3...38 км, где достигает максимального отрицательного значения  $-87,93$  % на 38 км. Максимальная относи-

тельная разность изменяется от  $-11,86$  до  $26,74$  % на высоте  $26,3$  и  $36,3$  км соответственно. Минимальная по всем профилям относительная разность в этих высотах составляет  $-172,54$  % на  $37,6$  км и достигает  $-10,49$  % на  $19$  км. На высоте  $16$  км относительная разность варьируется в диапазоне минимума и максимума  $-45,17...23,91$  %, на  $38$  км от  $-125,56$  до  $15,72$  %.

**Таблица 3.** Координаты и время спутникового AURA (MLS) и лидарного зондирования, использованные для сравнения ВРО за январь 2018 г.

**Table 3.** Coordinates and time of satellite AURA (MLS) and lidar sounding, used to compare the OVD in January 2018

| Дата<br>Date | Лидарная станция<br>Lidar station |                                                       | Спутник AURA (MLS)<br>Satellite AURA (MLS) |                          |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------|
|              | Время по<br>Гринвичу<br>GTM       | Координаты<br>Coordinate<br>(56,5 с.ш.;<br>85,0 в.д.) | Время по<br>Гринвичу<br>GTM                | Координаты<br>Coordinate |
| 13.01.18     | 11:55–12:25                       |                                                       | 07:07                                      | 60.43 с.ш. 84.56 в.д     |
| 13.01.18     | 12:25–13:04                       |                                                       | 07:07                                      | 60.43 с.ш. 84.56 в.д     |
| 22.01.18     | 11:42–12:12                       |                                                       | 07:01                                      | 60.43 с.ш. 86.10 в.д     |
| 22.01.18     | 12:12–12:42                       |                                                       | 07:01                                      | 60.43 с.ш. 86.10 в.д     |
| 23.01.18     | 13:13–13:43                       |                                                       | 21:14                                      | 51.74 с.ш. 78.10 в.д     |
| 23.01.18     | 13:43–14:13                       |                                                       | 21:14                                      | 51.74 с.ш. 78.10 в.д     |
| 24.01.18     | 11:42–12:12                       |                                                       | 06:49                                      | 60.43 с.ш. 89.20 в.д     |
| 24.01.18     | 12:12–12:42                       |                                                       | 06:49                                      | 60.43 с.ш. 89.20 в.д     |
| 26.01.18     | 13:19–13:49                       |                                                       | 06:36                                      | 60.43 с.ш. 92.29 в.д     |
| 26.01.18     | 13:49–13:49                       |                                                       | 06:36                                      | 60.43 с.ш. 92.29 в.д     |
| 30.01.18     | 12:15–12:45                       |                                                       | 07:49                                      | 54.65 с.ш. 77.13 в.д     |
| 30.01.18     | 12:45–13:15                       |                                                       | 07:49                                      | 54.65 с.ш. 77.13 в.д     |
| 31.01.18     | 13:15–13:45                       |                                                       | 06:55                                      | 58.99 с.ш. 88.61 в.д     |
| 31.01.18     | 13:45–14:15                       |                                                       | 06:55                                      | 58.99 с.ш. 88.61 в.д     |

**Таблица 4.** Координаты и время спутникового MetOp (IASI) и лидарного зондирования тропосферы, использованные для сравнения ВРО за январь 2018 г.

**Table 4.** Coordinates and time of satellite MetOp (IASI) and lidar sounding, used to compare the OVD in January 2018

| Дата<br>Date | Лидарная станция<br>Lidar station |                                                       | Спутник MetOp (IASI)<br>Satellite MetOp (IASI) |                          |
|--------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------|
|              | Время по<br>Гринвичу<br>GTM       | Координаты<br>Coordinate<br>(56,5 с.ш.;<br>85,0 в.д.) | Время по<br>Гринвичу<br>GTM                    | Координаты<br>Coordinate |
| 13.01.18     | 13:28–14:02                       |                                                       | 13:53                                          | 56.47 с.ш. 85.04 в.д     |
| 13.01.18     | 14:03–14:37                       |                                                       | 13:53                                          | 56.47 с.ш. 85.04 в.д     |
| 22.01.18     | 12:58–13:32                       |                                                       | 14:08                                          | 56.47 с.ш. 85.04 в.д     |
| 22.01.18     | 13:32–14:06                       |                                                       | 14:08                                          | 56.47 с.ш. 85.04 в.д     |
| 23.01.18     | 11:41–12:15                       |                                                       | 14:29                                          | 56.47 с.ш. 85.04 в.д     |
| 23.01.18     | 12:15–12:49                       |                                                       | 14:29                                          | 56.47 с.ш. 85.04 в.д     |
| 24.01.18     | 13:04–13:38                       |                                                       | 14:08                                          | 56.47 с.ш. 85.04 в.д     |
| 24.01.18     | 13:38–14:12                       |                                                       | 14:08                                          | 56.47 с.ш. 85.04 в.д     |
| 26.01.18     | 11:51–12:25                       |                                                       | 14:23                                          | 56.47 с.ш. 85.04 в.д     |
| 26.01.18     | 12:25–12:59                       |                                                       | 14:23                                          | 56.47 с.ш. 85.04 в.д     |
| 30.01.18     | 13:27–14:01                       |                                                       | 13:44                                          | 56.47 с.ш. 85.04 в.д     |
| 30.01.18     | 14:01–14:35                       |                                                       | 13:44                                          | 56.47 с.ш. 85.04 в.д     |
| 31.01.18     | 11:52–12:26                       |                                                       | 14:20                                          | 56.47 с.ш. 85.04 в.д     |
| 31.01.18     | 12:26–13:00                       |                                                       | 14:20                                          | 56.47 с.ш. 85.04 в.д     |

Таким образом, проведенное сопоставление показывает, что абсолютные различия концентрации озона, измеренные на лидаре и прибором MLS (AURA), могут изменяться от  $-1,68 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> до  $1,54 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup>, и тогда, учитывая минимум и максимум относительной разницы, получаем ее варьирование, которое находится в диапазоне  $-125,56... +26,74$  %.

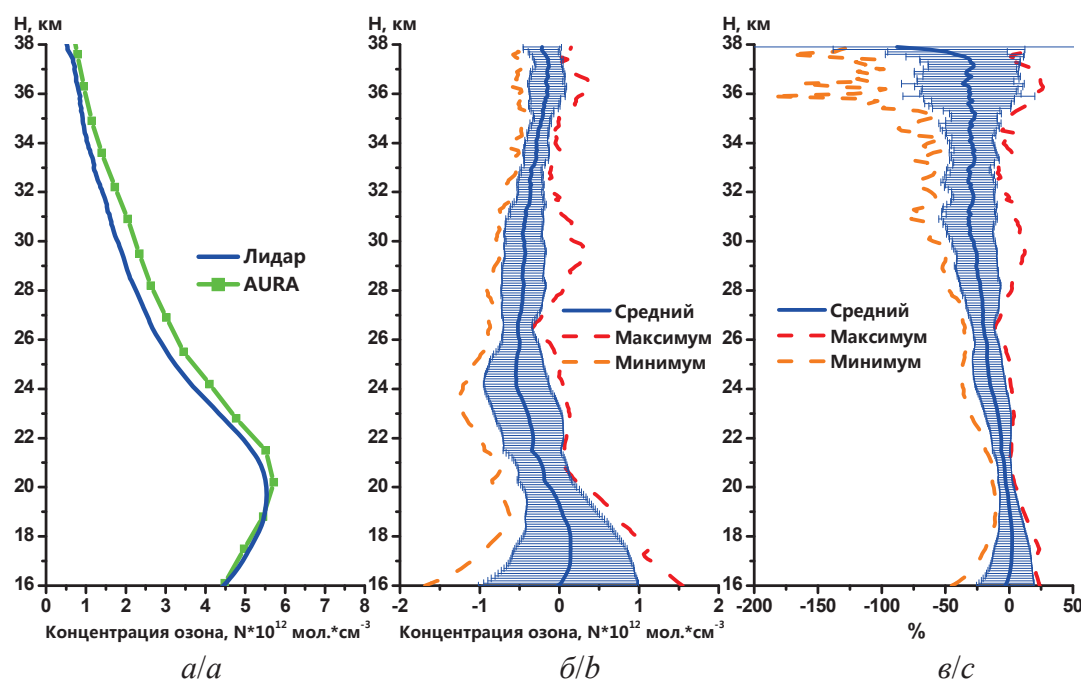


**Рис. 3.** Средние вертикальные профили озона и их различия: а) средние профили; б) различия Лидар и AURA в абсолютных единицах; в) относительные различия  $100 \cdot (\text{Лидар} - \text{AURA}) / \text{Лидар}$

**Fig. 3.** Average vertical profiles of ozone and their differences: а) average profiles; б) differences between Lidar and AURA in absolute units; в) relative differences  $100 \cdot (\text{Lidar} - \text{AURA}) / \text{Lidar}$

На рис. 4 представлено вертикальное распределение средней ошибки восстановления и, соответственно, средние профили озона лидарных и спутниковых измерений стратосферы. При восстановлении стратосферного озона из лидарных данных считаем, что атмосфера находится в невозмущенном состоянии, поэтому в расчете ошибок ВРО аэрозольная коррекция не участвует и соответственно неточности отношения рассеяния не учитываются.

Лидарные профили озона, полученные на СЛС и ВРО по IASI данным (рис. 5), приведены к общему высотному диапазону 6–18 км для более удобного сравнения всех профилей.

Из рис. 5, а видно, что для всего периода наблюдений прослеживается в ряде измерений завышение концентраций озона по лидару в сравнении с данными IASI в диапазоне от 12 до 18 км.

Из анализа данных ВРО верхней тропосферы – нижней стратосферы за весь рассматриваемый период 2018 г., приведенных на рис. 5, можно сделать следующие выводы. Разница между профилями концентраций озона (рис. 5, а, б), полученная на лидаре и IASI, растет с увеличением высоты. Вследствие этого средняя разность (Лидар–IASI) или отклонение по всем дням измерений в концентрациях озона изменяются от  $0,04 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> на высоте 6,7 км до  $1,69 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> на высоте 16,3 км (рис. 5, б). Максимальное по всем профилям отклонение составляет от  $0,47 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> на высоте 6,5 км до  $2,35 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> на высоте 16,1 км. Минимальное отклонение также по всем профилям изменяется от  $-0,36 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> на 6,4 км до  $0,99 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> на высоте 16,8 км.

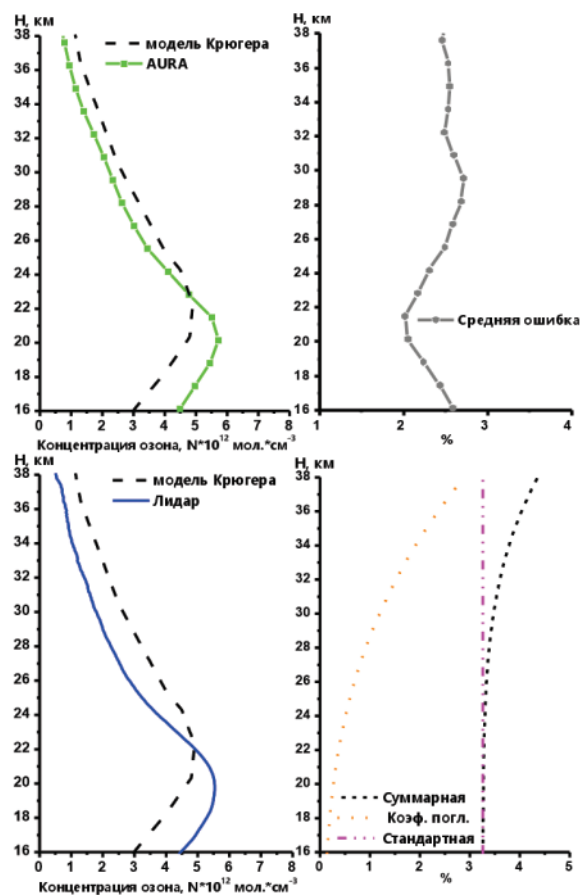


Рис. 4. Средние ВРО лидара и AURA с ошибками восстановления  
Fig. 4. Average OVD for LIDAR and AURA with recovery errors

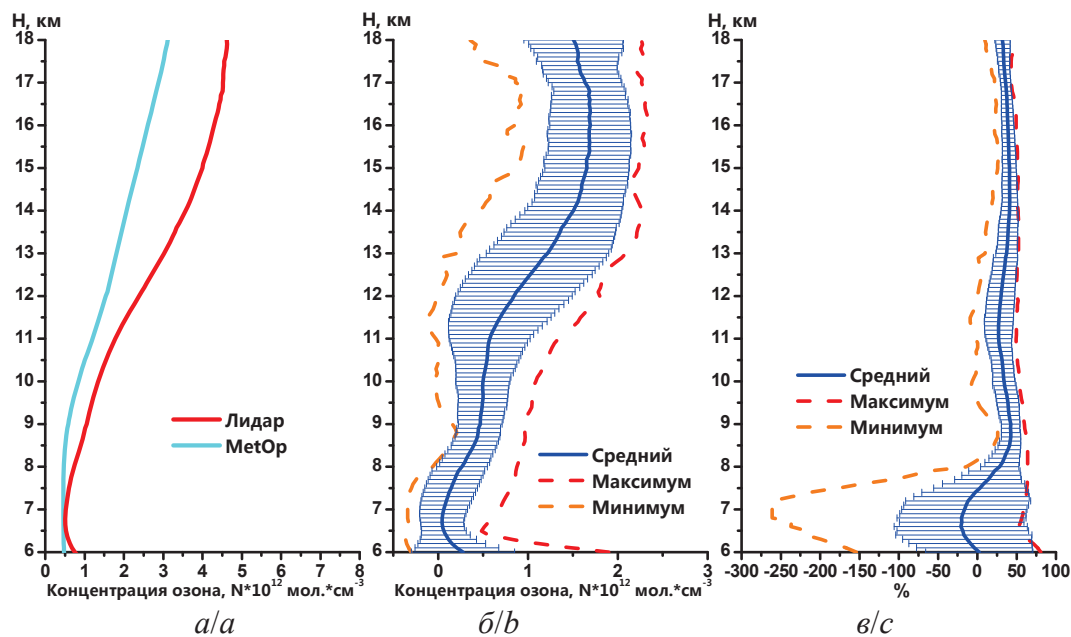


Рис. 5. Средние профили озона и их различия: а) средние профили; б) различия Лидара и IASI (MetOp) в абсолютных единицах; в) относительные различия  $100 \cdot (\text{Лидар} - \text{IASI}) / \text{Лидар}$

Fig. 5. Average profiles of ozone and their differences: а) average profiles; б) differences between Lidar and IASI (MetOp) in absolute units; в) relative differences  $100 \cdot (\text{Lidar} - \text{IASI}) / \text{Lidar}$

Поскольку озон имеет заметный годовой ход, то для того, чтобы найти относительные погрешности его измерения прибором IASI (MetOp), разность концентраций нормировали на значения, полученные лидаром:  $100 \cdot (\text{Лидар} - \text{IASI}) / \text{Лидар}$ . Эти данные представлены на рис. 5 в, из которого видно, что средняя относительная разность положительна в диапазоне высот 6 и 7,5...18 км, где достигает 42,75 % на 8,7 км, и отрицательна в диапазоне высот 6,1...7,4 км, где достигает -20,98 % на 6,6 км.

Максимальная относительная разность изменяется от 42,49 до 80,73 % на высоте 17,3 и 6 км соответственно. Минимальная по всем профилям относительная разность в этих высотах составляет -261,53 % на 6,8 км и достигает 26,88 % на 8,9 км. Такое значение минимума относительной разности обусловлено измерениями (13.01.18, 22.01.18 и др.), когда значения спутникового профиля значительно больше лидарного. Поэтому получается такая петля в высотах от 6 до 8 км на рис. 5, в. На высоте 18 км относительная разница варьируется в диапазоне минимума и максимума от 9,67 до 44,99 %, на 6 км от -154,16 до 80,73 %.

Таким образом, проведенное сопоставление показывает, что абсолютные различия концентрации озона, измеренные на лидаре и прибором IASI (MetOp), могут изменяться от  $-0,36 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> до  $2,35 \cdot 10^{12}$  мол. см<sup>-3</sup> и тогда, учитывая минимум и максимум относительной разницы, получаем ее варьирование, которое находится в диапазоне -261,53... +80,73 %.

Из рис. 6 видно, что ошибка восстановления от ~6,7 % на высоте 5 км до ~12 % на 18 км. Видно, что существенный вклад в общую ошибку вносит неточность отношения рассеяния.

На рис. 7 приведены некоторые общие ВРО, которые объединяют лидарный контроль стратосферы и верхней тропосферы – нижней стратосферы в общую кривую ВРО. Такой комплексный подход измерений ВРО дает возможность более полно производить лидарный контроль процессов стратосферно-тропосферного обмена воздушных масс. Из рис. 7 видно, что стратосферные лидарные и спутниковые наблюдения хорошо согласуются.

#### Заключение

Таким образом, создан лидар для измерения ВРО в верхней тропосфере – стратосфере в высотном диапазоне ~(5–45) км на длинах волн 299/341 и 308/353 нм. Следующим шагом модернизации лидарного комплекса для измерения ВРО является модификация лидарного приемника и настройка передатчиков для одновременного зондирования всей тропосферы и стратосферы или создание еще одного лидарного приемника, настроенного на прием сигналов второй пары длин волн. Это позволит сократить время измерений вдвое и соответственно увеличить количество измерений. Последующим шагом стоит реализация зондирования неохваченных высот 0,1–5 км, что позволит контролировать всю озоносферу.

Результаты сопоставления восстановленных лидарных профилей ВРО в верхней тропосфере – нижней стратосфере и стратосфере со спутниковыми профилями AURA (MLS) и IASI/MetOp, а также спитый профиль ВРО верхней тропосферы – стратосферы в сравнении со среднеширотной моделью Крюгера подтверждают перспективность использования пар длин волн зондирования озона 299/341 и 308/353 нм. Стоит отметить, что

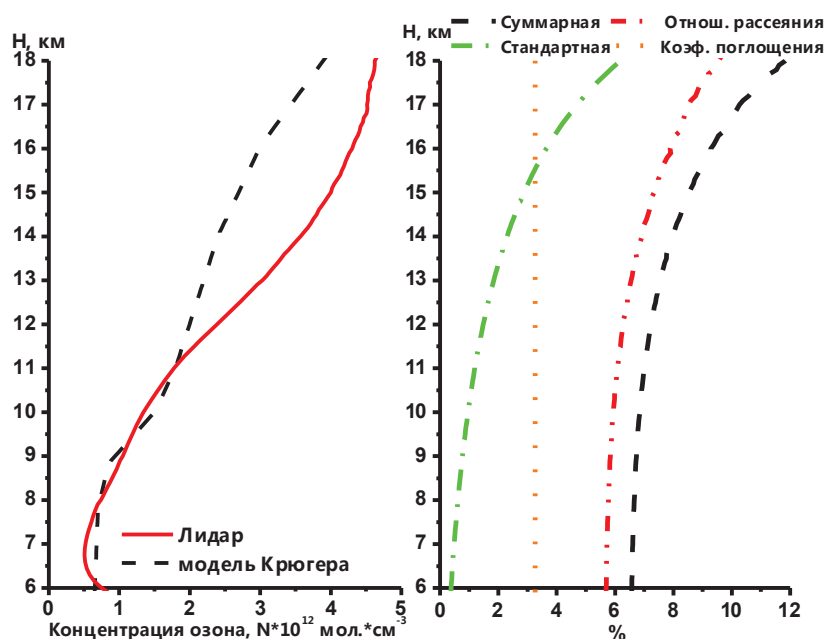


Рис. 6. Средние ВРО лидара и ошибки восстановления в верхней тропосфере – нижней стратосфере

Fig. 6. Average OVD for LIDAR and recovery errors in upper troposphere – lower stratosphere

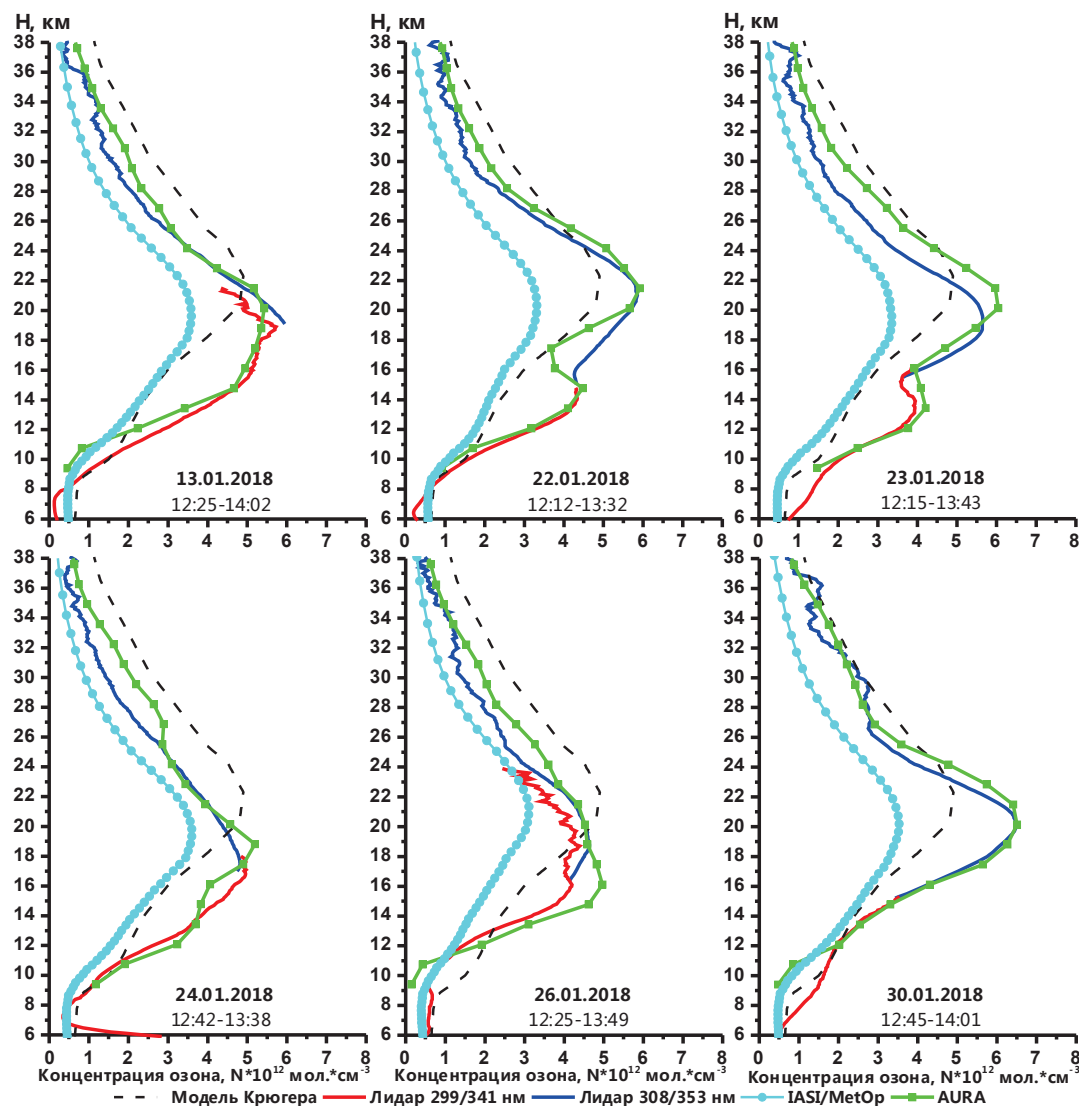


Рис.7. Сопоставление вертикальных профилей озона верхней тропосферы – стратосферы с спутниковыми данными AURA и MetOp

Fig. 7. Comparison of vertical ozone profiles of the upper troposphere – stratosphere with satellite data AURA and MetOp

восстановленные профили высотного распределения концентрации озона больше тяготеют к профилям спутниковых данных AURA, чем к модели Крюгера.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке стипендии Президента РФ по поддержке молодых ученых и аспирантов (СП-3926.2018.3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лидарное зондирование озона в верхней тропосфере – нижней стратосфере: методика и результаты измерений / В.Д. Бурлаков, С.И. Долгий, А.А. Невзоров, А.В. Невзоров, О.А. Романовский, О.В. Харченко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 9. – С. 124–132.
2. Weitkamp C. Lidar: range resolved optical remote sensing of the atmosphere. – New York: Springer-Verlag New York, 2005. – 456 p.
3. Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы / С.М. Бобровников, Г.Г. Матвиенко, О.А. Романовский, И.Б. Сериков, А.Я. Суханов. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. – 510 с.
4. Лидарный мониторинг облачных и аэрозольных полей, малых газовых составляющих и метеопараметров атмосферы / Ю.С. Балин, А.Г. Боровой, В.Д. Бурлаков, С.И. Долгий, М.Г. Клемашева, А.В. Коношонкин, Г.П. Коханенко, Н.В. Кустова, В.Н. Маричев, Г.Г. Матвиенко, А.А. Невзоров, А.В. Невзоров, И.Э. Пеннер, О.А. Романовский, С.В. Самойлова, А.Я. Суханов, О.В. Харченко, В.А. Шишко. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2015. – 450 с.
5. Сибирская лидарная станция: аппаратура и результаты / Г.Г. Матвиенко, Ю.С. Балин, С.М. Бобровников, О.А. Романовский, Г.П. Коханенко, С.В. Самойлова, И. Э. Пеннер, Е.В. Горлов, В.И. Жарков, С.А. Садовников, О.В. Харченко, С.В. Яковлев, О.Е. Баженов, В.Д. Бурлаков, С.И. Долгий, А.П. Макеев, А.А. Невзоров, А.В. Невзоров. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. – 440 с.

6. Comparison of ozone profiles from DIAL, MLS, and chemical transport model simulations over Rio Gallegos, Argentina, during the spring Antarctic vortex breakup, 2009 / T. Sugita, H. Akiyoshi, E. Wolfram, J. Salvador, H. Ohyama, A. Mizuno // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2017. – V. 10. – Iss. 12. – P. 4947–4964.
7. Tropospheric ozone profiles by DIAL at Maïdo Observatory (Reunion Island): system description, instrumental performance and result comparison with ozone external data set / V. Dufлот, J.-L. Baray, G. Payen, N. Marquestaut, Fr. Posny, J.-M. Metzger, B. Langerock, C. Vigouroux, J. Hadji-Lazaro, Th. Portafax, M. De Mazière, P.-Fr. Coheur, C. Clerbaux, J.-P. Cammas // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2017. – V. 10. – Iss. 9. – P. 3359–3373.
8. Airborne lidar measurements of aerosol and ozone above the Canadian oil sands region / M. Aggarwal, J. Whiteway, J. Seabrook, L. Gray, K. Strawbridge, P. Liu, J. O'Brien, Sh.-M. Li, R. McLaren // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2018. – V. 11. – Iss. 6. – P. 3829–3849.
9. Quantifying TOLNet ozone lidar accuracy during the 2014 DISCOVER-AQ and FRAPPÉ campaigns / L. Wang, M.J. Newchurch, R.J. Alvarez II, T.A. Berkoff, S. Brown, W. Carrion, R.J. De Young, B.J. Johnson, R. Ganoë, G. Gronoff, G. Kirgis, Sh. Kuang, A.O. Langford, T. Leblanc, E.E. McDuffie, T.J. McGee, D. Pliutau, C.J. Senff, J.T. Sullivan, G. Sumnicht, L.W. Twigg, A.J. Weinheimer // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2017. – V. 10. – Iss. 10. – P. 3865–3876.
10. Algorithm improvement and validation of National Institute for Environmental Studies ozone differential absorption lidar at the Tsukuba Network for Detection of Stratospheric Change complementary station / Ch.B. Park, H. Nakane, N. Sugimoto, Ich. Matsui, Y. Sasano, Y. Fujinuma, Iz. Ikeuchi, J.-Ich. Kurokawa, N. Furuhashi // *Applied Optics*. – 2006. – V. 45. – № 15. – P. 3561–3576.
11. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide/ M. Nakazato, T. Nagai, T. Sakai, Y. Hirose // *Applied Optics*. – 2007. – V. 46. – № 12. – P. 2269–2279.
12. Godin-Beekmanna S., Songa T., Heeseb B. Long-term DIAL monitoring of the stratospheric ozone vertical distribution // *Proceedings of SPIE*. – 2003. – V. 4893. – P. 251–263.
13. Gaudel A., Ancellet G., Godin-Beekmann S. Analysis of 20 years of tropospheric ozone vertical profiles by lidar and ECC at Observatoire de Haute Provence (OHP) at 44N, 6.7E // *Atmospheric Environment*. – 2015. – V. 113. – P. 78–89.
14. McDermid I.S., Godin S.M., Lindquist L.O. Ground-based laser DIAL system for long-term measurements of stratospheric ozone // *Applied Optics*. – 1990. – V. 29. – № 25. – P. 3603–3612.
15. Redesign and improved performance of the tropospheric ozone lidar at the Jet Propulsion Laboratory Table Mountain Facility / I.S. McDermid, G. Beyerle, D.A. Haner, T. Leblanc // *Applied Optics*. – 2002. – V. 41. – № 36. – P. 7550–7555.
16. Intercomparison of stratospheric ozone and temperature profiles during the October 2005 Hohenpeißenberg Ozone Profiling Experiment (HOPE) / W. Steinbrecht, T.J. McGee, L.W. Twigg, H. Claude, F. Schönerborn, G.K. Sumnicht, D. Silbert // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2009. – V. 2. – Iss. 1. – P. 125–145.
17. A mobile differential absorption lidar to measure sub-hourly fluctuation of tropospheric ozone profiles in the Baltimore–Washington, D.C. region / J.T. Sullivan, T.J. McGee, G.K. Sumnicht, L.W. Twigg, R.M. Hoff // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2014. – V. 7. – Iss. 10. – P. 3529–3548.
18. Lidar Measurements of Variability of the Vertical Ozone Distribution Caused by the Stratosphere–Troposphere Exchange in the Far East Region / A.N. Pavlov, S.Yu. Stolyarchuk, K.A. Shmirko, O.A. Bukin // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2013. – V. 26. – № 2. – P. 126–134.
19. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Модернизация измерительного комплекса Сибирской лидарной станции // *Оптика атмосферы и океана*. – 2004. – Т. 5. – № 10. – С. 1022–1027.
20. Intercomparison of ozone vertical profile measurements by differential absorption lidar and IASI/MetOp satellite in the upper troposphere–lower stratosphere / S.I. Dolgii, A.A. Nevzorov, A.V. Nevzorov, O.A. Romanovskii, O.V. Kharchenko // *Remote Sensing*. – 2017. – V. 9. – № 5. – P. 447–462.
21. MLS data documentation. URL: <https://mls.jpl.nasa.gov/data/datadocs.php> (дата обращения 30.07.18).
22. Goddard Space Flight Center. Данные бортового прибора MLS спутника AURA. URL: <https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/MLS/V04/L2GPOVP/O3/> (дата обращения 30.07.18).
23. IASI on Metop-A: Operational Level 2 retrievals after five years in orbit / T. August, D. Klaes, P. Schlüssel, T. Hultberg, M. Crapau, A. Arriaga, A. O'Carroll, D. Coppens, R. Munro, X. Calbet // *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*. – 2012. – V. 113. – № 11. – P. 1340–1371.
24. Mezheris R. Laser remote sensing. – Moscow: World Publ., 1987. – 552 P.
25. High spectral resolution ozone absorption cross-sections – P. 1: Measurements, data analysis and comparison with previous measurements around 293 K / V. Gorshelev, A. Serdyuchenko, M. Weber, W. Chehade, J.P. Burrows // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2014. – V. 7. – Iss. 2. – P. 609–624.
26. High spectral resolution ozone absorption cross-sections – Part 2: Temperature dependence / A. Serdyuchenko, V. Gorshelev, M. Weber, W. Chehade, J.P. Burrows // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2014. – V. 7. – Iss. 2. – P. 625–636.
27. El'nikov A.V., Zuev V.V. Bifrequency laser sounding of stratospheric ozone under conditions of high degree of aerosol loading // *Atmospheric and oceanic optics*. – 1992. – V. 5. – № 10. – P. 681–683.
28. Ozone UV spectroscopy. II. Absorption cross-sections and temperature dependence/ J. Malicet, D. Daumont, J. Charbonnier, C. Parisse, A. Chakir, J. Brion // *Journal of Atmospheric Chemistry*. – 1995. – V. 21. – Iss. 3. – P. 263–273.
29. The Huggins band of ozone: Assignment of hot bands / H. Zhu, Z.W. Qu, S.Y. Grebenshchikov, R. Schinke, J. Malicet, J. Brion, D. Daumont // *Journal of Chemical Physics*. – 2005. – V. 122. – Iss. 2. – Article Number 024310.
30. Krueger A.J., Minzner R.A. Mid-latitude ozone model for the 1976 U.S. Standard Atmosphere // *Journal of Geophysical Research*. – 1976. – V. 81. – № D24. – P. 4477–4481.

Поступила 07.11.2018 г.

#### **Информация об авторах**

**Долгий С.И.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Центра лазерного зондирования атмосферы Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук.

**Невзоров А.А.**, аспирант, младший научный сотрудник научно-образовательного центра Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук.

**Невзоров А.В.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Центра лазерного зондирования атмосферы Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук.

**Романовский О.А.**, доктор физико-математических наук, заведующий научно-образовательным центром Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук; профессор кафедры управления инновациями факультета инновационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Харченко О.В.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник центра лазерного зондирования атмосферы Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 551.510.532; 551.501.816

## LIDAR FOR MEASUREMENT OF OZONE VERTICAL DISTRIBUTION IN THE ATMOSPHERE

Sergey I. Dolgii<sup>1</sup>,  
dolgii@iao.ru

Alexey A. Nevzorov<sup>1</sup>,  
naa@iao.ru

Alexey V. Nevzorov<sup>1</sup>,  
nevzorov@iao.ru

Oleg A. Romanovskii<sup>1,2</sup>,  
roa@iao.ru

Olga V. Kharchenko<sup>1</sup>,  
olya@iao.ru

<sup>1</sup> V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS,  
1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

One of the main climate-forming factors from the point of view of the radiation balance of the atmosphere are greenhouse gases, primarily ozone and gas components of the ozone cycles. Currently, operational information on their vertical distribution in the atmosphere can be obtained only using remote sensing, including laser one (lidar), which determines the relevance and scientific significance of this scientific and technical problem.

**The main aim** of the study is to develop a lidar for studies of vertical distribution of ozone in the upper troposphere–stratosphere in the altitude range ~ (5–45) km at 299/341 and 308/353 nm in comparison with satellite measurements.

**Methods:** differential absorption lidar (DIAL).

**Results.** The paper introduces the lidar for measuring ozone vertical distribution above the city of Tomsk (56,5 N, 85,0 E). Lidar sounding of ozone was carried out on pairs of wavelengths 299/341 and 308/353 nm. The wavelengths used allow monitoring ozone vertical stratification within the upper troposphere, the stratosphere. The results of ozone lidar sensing as of January 2018 are given in comparison with the data of the satellites IASI/MetOp and AURA, as well as with the mid-latitude model of Kruger. The difference between the lidar profiles of ozone and the model ones is natural for the dynamics of the ozone layer on different observation days. The large differences in ozone vertical distribution in the values of lidar and the MetOp satellite at the altitudes of the stratosphere are explained by the need to correct the a priori model in the algorithm for reconstructing satellite data.

**Conclusion.** The lidar was developed to measure ozone profiles in the upper troposphere–the stratosphere. It allows reconstructing the vertical distribution of ozone in the altitude range ~ (5–45) km at wavelengths 299/341 and 308/353 nm.

#### Key words:

Lidar, ozone, atmosphere, differential absorption, MetOp satellite, AURA satellite.

The research was partially financially supported by the RF presidential scholarship for supporting young scientists and post-graduates (SP-3926.2018.3).

#### REFERENCES

1. Burlakov V.D., Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Lidar sensing of ozone in the upper troposphere – lower stratosphere: technique and result of measurements. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 9, pp. 124–132. In Rus.
2. Weitkamp C. *Lidar: range resolved optical remote sensing of the atmosphere*. New York, Springer-Verlag New York Publ., 2005. 456 p.
3. Bobrovnikov S.M., Matvienko G.G., Romanovskii O.A., Serikov I.B., Sukhanov A.Y. *Lidarny spektroskopicheskiy gazoanaliz atmosfery* [Lidar spectroscopic gas analysis of the atmosphere]. Tomsk, IAO SO RAN Publ., 2014. 510 p.
4. Balin Yu.S., Borovoy A.G., Burlakov V.D., Dolgii S.I., Klemasheva M.G., Konoshonkin A.V., Kokhanenko G.P., Kustov N.V., Marichev V.N., Matvienko G.G., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Penner I., Romanovskiy O.A., Samokhvalov S.V., Sukhanov A.Ya., Kharchenko O.V., Shishko V.A. *Lidarny monitoring oblachnykh i aerosolnykh poley, malykh gasovyykh sostavlyayshchikh meteoparametrov atmosfery* [Lidar monitoring of cloudy and aerosol fields, small gas components and meteoparameters of the atmosphere]. Tomsk, IAO SO RAN Publ., 2015. 450 p.
5. Matvienko G.G., Balin Yu.S., Bobrovnikov S.M., Romanovskiy O.A., Kokhanenko G.P., Samoylova S.V., Penner I., Gorlov E.V., Zharkov V.I., Sadovnikov S.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V., Bazhenov O.E., Burlakov V.D., Dolgii S.I., Makeyev A.P., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V. *Sibirskaya lidarnaya stantsiya: apparatura i rezultaty* [Siberian lidar station: equipment and results]. Tomsk, IAO SO RAN Publ., 2016. 440 p.
6. Sugita T., Akiyoshi H., Wolfram E., Salvador J., Ohya H., Mizuno A. Comparison of ozone profiles from DIAL, MLS, and chemical transport model simulations over Rio Gallegos, Argentina, during the spring Antarctic vortex breakup, 2009. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, vol. 10, Iss. 12, pp. 4947–4964.

7. Duflet V., Baray J.-L., Payen G., Marquestaut N., Posny Fr., Metzger J.-M., Langerock B., Vigouroux C., Hadji-Lazaro J., Portafaix Th., De Mazière M., Coheur P.-Fr., Clerbaux C., Cammas J.-P. Tropospheric ozone profiles by DIAL at Maïdo Observatory (Reunion Island): system description, instrumental performance and result comparison with ozone external data set. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, vol. 10, Iss. 9, pp. 3359–3373.
8. Aggarwal M., Whiteway J., Seabrook J., Gray L., Strawbridge K., Liu P., O'Brien J., Li Sh.-M., McLaren R. Airborne lidar measurements of aerosol and ozone above the Canadian oil sands region. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, vol. 11, Iss. 6, pp. 3829–3849.
9. Wang L., Newchurch M.J., Alvarez II R.J., Berkoff T.A., Brown S., Carrion W., De Young R.J., Johnson B.J., Gaoe R., Gronoff G., Kirgis G., Kuang Sh., Langford A.O., Leblanc T., McDuffie E.E., McGee T.J., Pliutau D., Senff C.J., Sullivan J.T., Sumnicht G., Twigg L.W., Weinheimer A.J. Quantifying TOLNet ozone lidar accuracy during the 2014 DISCOVER-AQ and FRAPPE campaigns. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, vol. 10, Iss. 10, pp. 3865–3876.
10. Park Ch.B., Nakane H., Sugimoto N., Matsui Ich., Sasano Y., Fujinuma Y., Ikeuchi Iz., Kurokawa J.-Ich., Furuhashi N. Algorithm improvement and validation of National Institute for Environmental Studies ozone differential absorption lidar at the Tsukuba Network for Detection of Stratospheric Change complementary station. *Applied Optics*, 2006, vol. 45, no. 15, pp. 3561–3576.
11. Nakazato M., Nagai T., Sakai T., Hirose Y. Tropospheric ozone differential-absorption lidar using stimulated Raman scattering in carbon dioxide. *Applied Optics*, 2007, vol. 46, no. 12, pp. 2269–2279.
12. Godin-Beekmanna S., Songa T., Heeseb B. Long-term DIAL monitoring of the stratospheric ozone vertical distribution. *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 4893, pp. 251–263.
13. Gaudel A., Ancellet G., Godin-Beekmann S. Analysis of 20 years of tropospheric ozone vertical profiles by lidar and ECC at Observatoire de Haute Provence (OHP) at 44N, 6.7E. *Atmospheric Environment*, 2015, vol. 113, pp. 78–89.
14. McDermid I.S., Godin S.M., Lindquist L.O. Ground-based laser DIAL system for long-term measurements of stratospheric ozone. *Applied Optics*, 1990, vol. 29, no. 25, pp. 3603–3612.
15. McDermid I.S., Beyerle G., Haner D.A., Leblanc T. Redesign and improved performance of the tropospheric ozone lidar at the Jet Propulsion Laboratory Table Mountain Facility. *Applied Optics*, 2002, vol. 41, no. 36, pp. 7550–7555.
16. Steinbrecht W., McGee T.J., Twigg L.W., Claude H., Schönnenborn F., Sumnicht G.K., Silbert D. Intercomparison of stratospheric ozone and temperature profiles during the October 2005 Hohenpeißenberg Ozone Profiling Experiment (HOPE). *Atmospheric Measurement Techniques*, 2009, no. 2, Iss. 1, pp. 125–145.
17. Sullivan J.T., McGee T.J., Sumnicht G.K., Twigg L.W., Hoff R.M. A mobile differential absorption lidar to measure sub-hourly fluctuation of tropospheric ozone profiles in the Baltimore–Washington, D.C. region. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, vol. 7, Iss. 10, pp. 3529–3548.
18. Pavlov A.N., Stolyarchuk S.Yu., Shmirko K.A., Bukin O.A. Lidar Measurements of Variability of the Vertical Ozone Distribution Caused by the Stratosphere–Troposphere Exchange in the Far East Region. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2013, vol. 26, no. 2, pp. 126–134.
19. Burlakov V.D., Dolgii S.I., Nevzorov A.V. Modernizatsiya izmeritelnogo kompleksa Sibirskoy lidarnoy stansii [Modification of the measuring complex at the Siberian Lidar Station]. *Atmospheric and oceanic optics*, 2004, vol. 5, no. 10, pp. 1022–1027.
20. Dolgii S.I., Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Romanovskii O.A., Kharchenko O.V. Intercomparison of ozone vertical profile measurements by differential absorption lidar and IASI/MetOp satellite in the upper troposphere–lower stratosphere. *Remote Sensing*, 2017, vol. 9, no. 5, pp. 447–462.
21. *MLS data documentation*. Available at: <https://mls.jpl.nasa.gov/data/datadocs.php> (accessed 30 July 18).
22. *Goddard Space Flight Center. Dannie sputnika AURA (MLS) [AURA (MLS) data]*. Available at: <https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/MLS/V04/L2GPOVP/O3/> (accessed 30 July 18).
23. August T., Klaes D., Schlüssel P., Hultberg T., Crapeau M., Arriaga A., O'Carroll A., Coppens D., Munro R., Calbet X. IASI on Metop-A: Operational Level 2 retrievals after five years in orbit. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2012, vol. 113, no. 11, pp. 1340–1371.
24. Mezheris R. *Laser remote sensing*. Moscow, World Publ., 1987. 552 p.
25. Gorshelev V., Serdyuchenko A., Weber M., Chehade W., Burrows J.P. High spectral resolution ozone absorption cross-sections – Part 1: Measurements, data analysis and comparison with previous measurements around 293 K. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, vol. 7, Iss. 2, pp. 609–624.
26. Serdyuchenko A., Gorshelev V., Weber M., Chehade W., Burrows J.P. High spectral resolution ozone absorption cross-sections – Part 2: Temperature dependence. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, vol. 7, Iss. 2, pp. 625–636.
27. El'nikov A.V., Zuev V.V. Bifrequency laser sounding of stratospheric ozone under conditions of high degree of aerosol loading. *Atmospheric and oceanic optics*, 1992, vol. 5, no. 10, pp. 681–683.
28. Malicet J., Daumont D., Charbonnier J., Parisse C., Chakir A., Brion J. Ozone UV spectroscopy. II. Absorption cross-sections and temperature dependence. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1995, vol. 21, Iss. 3, pp. 263–273.
29. Zhu H., Qu Z.W., Grebenshchikov S.Y., Schinke R., Malicet J., Brion J., Daumont D. The Huggins band of ozone: Assignment of hot bands. *Journal of Chemical Physics*, 2005, vol. 122, Iss. 2, article number 024310.
30. Krueger A.J., Minzner R.A. Mid-latitude ozone model for the 1976 U.S. Standard Atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 1976, vol. 81, no. D24, pp. 4477–4481.

Received: 7 November 2018.

#### Information about the authors

**Sergey I. Dolgii**, Cand. Sc., senior researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS.

**Alexey A. Nevzorov**, junior researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS; postgraduate, National Research Tomsk State University.

**Alexey V. Nevzorov**, Cand. Sc., senior researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS.

**Oleg A. Romanovskii**, Dr. Sc., head of the Research and Educational Centre, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS; National Research Tomsk State University.

**Olga V. Kharchenko**, Cand. Sc., senior researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS.

УДК 519.17: 621.644.07

## ОПТИМИЗАЦИЯ МАРШРУТОВ ПРОКЛАДКИ МАГИСТРАЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА ДЛЯ ТРАНСПОРТИРОВКИ ГЕОРЕСУРСОВ

Токтошов Гулжигит Ысакович<sup>1</sup>,  
tgi\_tok@rambler.ru

Юргенсон Анастасия Николаевна<sup>1</sup>,  
nasty@rav.sccc.ru

Мигов Денис Александрович<sup>1</sup>,  
mdinka@rav.sccc.ru

<sup>1</sup> Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью транспортировки добытого георесурса от месторождений до их переработки, с целью дальнейшего распределения между потребителями ресурсов различного назначения. В связи с этим актуальным является задача выбора маршрута прокладки магистрального трубопровода, осуществляющего транспортировку георесурсов от места добычи до мест их переработки. При этом должна быть обеспечена минимальность капитальных вложений и эксплуатационных затрат, а также надёжность функционирования магистрального трубопровода в условиях непредвиденных природно-техногенных воздействий.

**Цель:** предложить новый метод для прокладки магистрального трубопровода, учитывающий совместимость или несовместимость различных типов трубопроводного транспорта в одном техническом коридоре, а также надёжность их функционирования.

**Объекты:** магистральный трубопровод, прокладываемый на заданной территории.

**Методы:** методы теории графов и теории гиперсетей; методы эволюционного синтеза; компьютерное моделирование процесса транспортировки георесурсов; дискретизация области размещения магистрального трубопровода.

**Результаты.** Предложен новый математический аппарат, основанный на модели теории гиперсетей, учитывающий иерархичность структуры проектируемого магистрального трубопровода. На основе гиперсетевого подхода получен новый метод прокладки магистрального трубопровода, учитывающий несовместимость различных типов ресурсов для прокладки в одном техническом коридоре. Разработан двухэтапный метод построения магистрального трубопровода, обеспечивающий минимальность капитальных вложений и эксплуатационных затрат. Кроме того, разработан модифицированный муравьиный алгоритм, обеспечивающий получение не только дешевого решения, но и достаточно надёжного по отношению к заданному порогу, при условии, что сбои происходят в первичной (физической) сети. В качестве показателя надёжности мы рассматриваем минимум среди всех парных вероятностей связности между каждым перерабатывающим пунктом и соответствующим источником. Полученные в ходе исследования численные эксперименты показывают применимость предложенных нами методов.

### Ключевые слова:

Георесурсы, область размещения, транспортировка георесурсов, магистральный трубопровод, граф, гиперсеть, первичная сеть, вторичная сеть, надёжность сети, эволюционные алгоритмы.

### Введение

Роль трубопроводного транспорта в добыче и освоении полезных ископаемых (нефть, природный газ, подземные минеральные и пресные воды и т. п.) чрезвычайно высока. Трубопроводная транспортировка является основным и одним из дешёвых видов транспорта георесурсов от мест добычи на перерабатывающие пункты. При этом возникает задача поиска оптимального маршрута для прокладки магистрального трубопровода в областях со сложными природно-климатическими и инженерно-геологическими условиями, которые определяют направление прокладки и взаимное расположение трубопроводных систем. Для этой задачи необходимо находить достаточно приемлемый вариант решения, который позволяет максимизировать объёмы добычи и получаемую прибыль, или минимизировать затраты на добычу, транспортировку и первичную переработку [1, 2].

Задачи, связанные с поиском маршрута прокладки, возникают и в других областях. Примера-

ми подобных задач являются: поиск оптимальных маршрутов для прокладки инженерных сетей [3–6], размещение объектов на заданной территории [7, 8], использование ГИС-технологий для анализа и размещения линейных объектов [9, 10], применение сплайнов в оптимизации трассировки автомобильных дорог [11], задачи размещения логистических объектов [12] и систем электроснабжения [13], проектирование и реконструкция транспортных сетей [14], маршрутизация сетей обслуживания [15]. В этих работах объекты сетевой структуры, в т. ч. и магистральный трубопровод, рассматриваются как двумерные объекты, размещённые на плоскости. Однако такое представление сетевых структур не достаточно соответствует реальности.

При проектировании и строительстве сетевых объектов необходимо учитывать взаимодействие не менее чем двух взаимосвязанных подсистем. Так, например, магистральный трубопровод укладывается на участке земной поверхности, кото-

рый, в свою очередь, становится техногенным элементом этой среды. И наоборот, участок земли, по которому был проложен магистральный трубопровод, становится частью трубопроводной системы. Таким образом, в данной работе магистральный трубопровод рассматривается как двухуровневая система, состоящая:

- из трассы (траншеи, коллекторы и т. п.) между заданными точками (источники и перерабатывающие пункты) на земной поверхности;
- магистрального трубопровода, укладываемого по соответствующим трассам, в зависимости от вида и назначения георесурса.

При выборе трассы магистрального трубопровода обобщающим критерием являются показатели капитальных вложений в сооружение трубопровода и эксплуатационные затраты в процессе его функционирования. Выбор направления трасс магистральных трубопроводов зависит от требований норм и технических условий на проектирование в части минимально допустимых расстояний от оси проектируемых линий (трубопроводов) до различных параллельно идущих коммуникаций, объектов и сооружений. Кроме того, выбор маршрута прокладки магистрального трубопровода на заданной территории затруднен большим количеством специфических природных условий, определяющих объем работ, их стоимость и надежность эксплуатации. К таким условиям относятся, прежде всего, сложный пересеченный рельеф местности с большим диапазоном относительных и абсолютных отметок, нежелательные физико-геологические явления (камнепады, снежные лавины, землетрясения, оползни и т. п.) и сложные метеорологические условия.

#### О математической модели магистрального трубопровода

Для моделирования различных сетевых объектов обычно используются графы и гиперграфы. Как уже упоминалось выше, структура проектируемого магистрального трубопровода представляет собой двухуровневую взаимосвязанную сеть – трасса и магистральный трубопровод, образующие иерархические структуры. В таком случае применение аппарата теории графов и гиперграфов не позволяет учесть реализацию трубопроводной системы по выбранным трассам. Поэтому в большинстве случаев вместо них используют другие сетевые модели [3, 4, 16–20]: вложенные графы [16], многоуровневые комплексные сети [17], гиперсети [18–20], а также другие объекты.

В настоящей работе в качестве математической модели для структуры магистрального трубопровода используется гиперсеть, поскольку в ней учитывается реализация вложения одной структуры в другую. В данном случае это реализация магистрального трубопровода по выбранным маршрутам, отмеченным на этапе проектирования. Гиперсеть, в отличие от графов и гиперграфов, учитывает взаимодействие двух подсистем, таких как трас-

са и магистральный трубопровод, а также взаимозависимость характеристик их элементов. Так, например, от вида и назначения транспортируемого ресурса (соответственно и от типа трубопровода) зависят стоимостные характеристики области размещения (аренда земельного участка, рытье траншеи, подготовительные работы, строительство опоры и т. п.). От категории местности (горная, холмистая, или равнинная) сильно зависят стоимостные характеристики будущего трубопровода. Некоторые наши результаты по применению данного подхода были приведены в работах [20–22].

Приведем наиболее общее определение гиперсети [18–20], несмотря на то, что для рассматриваемой задачи достаточно и более простого определения [21].

**Определение.** Гиперсеть  $HN=(X,Y,R;P,F,W)$  включает следующие объекты:

$X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – множество узлов (вершин);  $V=(v_1, v_2, \dots, v_g)$  – множество трасс;  $R=(r_1, r_2, \dots, r_m)$  – множество трубопроводов;  $P: V \rightarrow 2^X$  – отображение, сопоставляющее каждому элементу  $v \in V$  множество вершин  $P(v) \subseteq X$ . Тем самым отображение  $P$  определяет граф первичной сети  $PN=(X,Y;F: R \rightarrow 2^V$  – отображение, сопоставляющее каждому элементу  $r \in R$  множество трасс  $(r)$ , образующих простой маршрут в графе  $PN=(X,V)$ . Множество всех маршрутов  $F(r)$ , отображающее каждому ребру  $r \in R$  графа  $SN$  единственный маршрут в графе  $PN$ , назовем вложением графа  $SN$  в  $PN$ ;  $W: R \rightarrow 2^{V(F(r))}$  – отображение, сопоставляющее каждому элементу  $r \in R$  множество вершин  $W(r) \subseteq P(F(r))$  в графе  $PN$ , где  $P(F(r))=Y$  – множество вершин в  $PN$ , инцидентных трассам  $F(r) \subseteq V$ . Отображение  $W$  определяет граф вторичной сети  $SN=(Y,R)$ .

Из определения гиперсети следует, что математическая модель возможных трасс соответствует графу первичной сети  $PN=(X,V)$ , а структура магистрального трубопровода – графу вторичной сети  $SN=(Y,R)$ . Взаимодействие этих сетей определяется гиперсетью  $HN$ .

#### Совместимость различных типов ресурсов для прокладки в одном направлении

Рассмотрим возможность совмещенной прокладки параллельно идущих трубопроводов в одном техническом сооружении (траншее, коллекторе и т. п.) Необходимо учесть совместимость или несовместимость этих коммуникаций и нормативное расстояние между трубопроводами различного назначения.

Прокладка инженерных сетей по выбранной трассе (траншея, коллектор и т. п.) осуществляется строго с соблюдением установленных норм и правил, касающихся взаимного расположения сетей различного назначения. При этом должны учитываться минимально допустимые расстояния между различными инженерными сетями, прокладываемыми в одном направлении. В зависимости от вида, назначения и направления прокладки инже-

нерные сети могут быть проложены как совмещённо, так и раздельно. Отметим, что совмещённая прокладка сетей различного назначения в одном коллекторе допускается исключительно для совместимых (нейтральных) по механическим и электромагнитным воздействиям друг на друга сетей.

Так, например, в одном коллекторе заданного размера могут быть проложены идущие в одном направлении тепловые сети, напорные водопроводы и канализация, свыше десяти кабелей связи и силовых кабелей напряжением до 10 кВ. Не разрешается совместная прокладка газопроводов и трубопроводов с горючими веществами.

Таким образом, прокладка сетей инженерных коммуникаций связана с определением пространственного расположения всех элементов различных инженерных коммуникаций. Поиск оптимального варианта их размещения в одном коллекторе требует анализа множества этих вариантов, каждый из которых должен быть проверен на соответствие ограничениям математической модели. Эти ограничения включают в себя условия непересечения несовместимых инженерных коммуникаций, их взаимного расположения, и другие ограничения [23].

#### Постановка задачи

$D = \{(x, y) | a < x < b, c < y < d\}$  – прямоугольная картографируемая область, на которой предполагается строительство магистрального трубопровода;  $Y_{source} \subseteq D$  – множество источников георесурсов (газ, нефть, пресная вода и т. д.);  $Y_{station} \subseteq D$  – множество пунктов переработки.

Множество вершин  $X$  графа первичной сети  $PN = (X, V)$  включает в себя множество  $Y = Y_{source} \cup Y_{station}$ .

Пусть в графе  $PN = (X, V)$  заданы следующие характеристики:  $l(v)$  – длина ветви  $v \in V$ ;  $a(v)$  – стоимость земли (аренда, налог и т. д.) на участке  $v \in V$  предполагаемой трассы;  $b(v)$  – стоимость подготовительных и строительных работ (копка траншеи, строительство коллекторов, тоннелей и опор и т. п.) на участке  $v \in V$  предполагаемой трассы;  $\gamma_1$  – коэффициент дисконтирования строительных затрат для приведения экономических показателей разных лет к сопоставимым по времени величинам).

Пусть в графе вторичной сети  $SN = (Y, R)$  заданы следующие параметры:  $\rho(r) = \sum_{v \in F(r)} l(v)$  – длина

трубопровода  $r \in R$ , проходящего по ветвям  $v \in F(r)$  предполагаемой трассы;  $c(r)$  – стоимость строительства и монтажа самого трубопровода  $r \in R$ , соединяющего соответствующие пары узлов из  $Y$ ;  $\gamma_2$  – коэффициент дисконтирования стоимости трубопровода;  $d_v(r)$  – стоимость эксплуатации трубопроводов на участках  $v \in F(r)$ .

Пусть  $T$  – множество типов ресурсов, передаваемых через магистральные трубопроводы. Для каждого ребра  $r \in R$  зададим тип  $type(r) \in T$ . Тип ресурса однозначно определяет тип магистрального трубопровода.

Как было сказано выше, разные типы ресурсов могут быть несовместимы друг с другом для их прокладки в одном техническом коридоре.

Пусть бинарное отношение  $CT \subseteq T \times T$  определяется правилом: если  $(t_1, t_2) \in CT$ , то эти типы ресурсов могут быть проложены в одном и том же технологическом коридоре, т. е. два трубопровода различных типов могут быть проложены в одной ветви первичной сети.

Пусть  $MinCT(t_1, t_2, \dots, t_h)$  – минимальное число непересекающихся подмножеств, на которое можно разделить типы ресурсов  $\{t_1, t_2, \dots, t_h\}$  с учетом их совместимости.

Например, если существуют типы ресурсов  $\{t_1, t_2, t_3\}$ , такие что  $(t_1, t_2), (t_2, t_3) \in CT$ , но  $(t_1, t_3) \notin CT$ , тогда  $MinCT(t_1, t_2, t_3) = 2$ , поскольку эти типы ресурсов могут быть разделены на два подмножества  $\{t_1, t_2\}$  и  $\{t_3\}$ .

В общем случае задача поиска маршрутов прокладки магистрального трубопровода может быть сформулирована как задача поиска трасс для прокладки трубопроводов между заданных пар точек из  $Y = Y_{source} \cup Y_{station}$ , обеспечивающих минимальность затрат на построение и последующую эксплуатацию магистрального трубопровода.

**Постановка задачи:** построить гиперсеть  $HN$ , т. е. каждому ребру  $r \in R$  графа вторичной сети найти соответствующий маршрут в графе первичной сети  $PN$  таким образом, чтобы выполнялись все условия и ограничения, накладываемые на проектируемый тип трубопровода, причем следующий функционал должен иметь минимальное значение:

$$Q(HN) = \sum_{v \in V'} (a(v) + b(v)\gamma_1)\rho(v)MinCT(v) + \sum_{r \in R} \left( c(r) + \sum_{v \in F(r)} d(r)\gamma_2 \right) \rho(r), \quad (1)$$

где подмножество  $V' \subseteq V$  определяется следующим образом: для каждого элемента  $v \in V'$ ,  $\exists r \in R$  такое, что  $v \in F(r)$ . Пусть  $v \in V'$  и  $v \in F(r_i)$ ,  $i = 1, \dots, l(r_1, \dots, r_l \in R)$ , тогда  $MinCT(v) = MinCT(type(r_1), \dots, type(r_l))$ .

#### Двухэтапный алгоритм

В данном разделе предлагается двухэтапный алгоритм решения поставленной задачи. Сначала находится начальное приближенное решение, затем оно улучшается.

Для поиска начального решения используется «жадный» алгоритм и классический алгоритм Флойда.

Для алгоритмов Флойда и Дейкстры стоимость ветви  $v \in V$  на графе первичной сети  $PN$  равна  $a(v) + b(v)\gamma_1 + c(r) + d(r)\gamma_2\rho(v)$ . Для простоты будем считать  $\forall r \in R: c(r) + d(r)\gamma_2 = \text{const}$ .

Ниже будут описаны шаги предлагаемого алгоритма.

#### Алгоритм 1 («жадный»)

**Шаг 1.** Разделить типы ресурсов на непересекающиеся подмножества.

**Шаг 2.** Выбрать подмножество совместимых типов  $T'$  с наибольшим количеством ребер (для которых еще не найдено вложение в первичную сеть).

**Шаг 3.** Найти все кратчайшие пути  $(y_i, y_j)$ ,  $i, j=1, \dots, n$ ,  $i \neq j$  (существует ребро  $r$ ) в графе первичной сети  $PN=(X, Y)$  с помощью алгоритма Флойда. Паре вершин  $(y_i, y_j)$  соответствует ребро  $r$  во вторичной сети и  $type(r) \in T'$ .

Выбрать среди них путь минимальной стоимостью.

Осуществить вложение выбранного ребра  $r$  по кратчайшему пути  $(y_i, y_j)$  в графе  $PN$ .

Для всех  $v \in F(r)$  в графе первичной сети  $PN$   $a(v)=0$ ,  $b(v)=0$  (стоимость ветви равна нулю для прокладки остальных ребер).

Повторить **Шаг 3** пока для всех ребер  $r \in R$  вторичной сети, таких что  $type(r) \in T'$ , не будут найдены и реализованы кратчайшие пути.

**Шаг 4.** Присвоить изначальные значения  $a(v)$  и  $b(v)$ , которые обнулены на предыдущем шаге. Если не  $T' \neq \emptyset$ , переходим на **Шаг 2**.

Отметим, что жадный алгоритм является приближенным, поэтому полученные решения не всегда оптимальны. Можно улучшить решение, найдя новый маршрут  $r \in R$ . Например, новый маршрут  $F(r)$  дешевле для выбранного  $r \in R$ , если он включает в себя большее количество ветвей  $v \in F(r)$  с нулевой стоимостью (ветви, которые уже используются для других ребер  $r \in R$ ).

Можно упорядочить ребра по некоторому правилу, например, по числу наиболее редко используемых ветвей. Отметим, что в среднем полученные результаты сильно не зависят от используемого метода упорядочения [21].

Алгоритм 2 (Модифицированный)

**Шаг 1.** Упорядочить  $r \in R$  по убыванию их веса (получим список  $\{r_i\}$ ).

**Шаг 2.** «Удалить»  $r_i$  из гиперсети  $HN$  согласно списку, т. е.  $\forall v_k \in F(r_i)$ , восстановить начальные значения  $a(v_k)$  и  $b(v_k)$ , если  $v_k$  не входит в другие ребра.

Найти новый кратчайший путь для  $r_i$  в графе  $PN$  алгоритмом Дейкстры.

Для нового ребра  $r_i$ :  $a(v)=0$ ,  $b(v)=0$  для всех  $v \in F(r_i)$  в графе  $PN$ .

Повторить **Шаг 2** пока все ребра  $\{r_i\}$  из списка не будут обновлены.

Можно использовать несколько итераций Алгоритма 2 для поиска лучших результатов.

#### Численные эксперименты

В качестве первичной сети  $PN$  была взята сетка размерностью  $10 \times 10$  вершин. Количество ребер в  $SN$  для укладки в  $PN$  варьировалось от 10 до 800 (ось абсцисс на рис. 1).

Источники ресурсов и потребители произвольно размещались в сетке. Узел сетки может содержать несколько источников и потребителей. Каждому ребру случайно присваивается один из трех типов (набор типов ресурсов взят из примера в постановке задачи).

Случайное размещение выполняется 10 раз для заданного значения  $M$ . Найденная стоимость укладки усредняется.

На рис. 1 показана нормированная стоимость (т. е. находится минимальная стоимость и на нее делится все полученные значения). Из рисунка видно, что «жадный» алгоритм обеспечивает лучший результат для небольшого числа ребер, а для большого числа ребер более приемлемым является алгоритм Флойда.

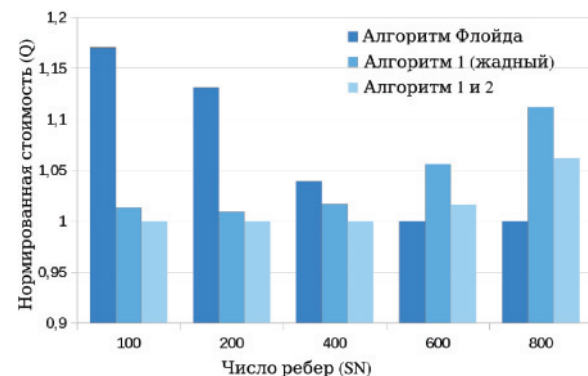


Рис. 1. Численные результаты: нормированная стоимость для решетки  $10 \times 10$ , количество ребер от 10 до 800

Fig. 1. Numerical results: normalized cost for the  $10 \times 10$  grid, the number of edges from 10 up to 800

#### Прокладка магистрального трубопровода с учетом заданного уровня надёжности

В этом разделе мы модифицируем ранее предложенный алгоритм для нахождения не только самого дешевого решения, но и достаточно надёжного. Отметим, что анализ надёжности гиперсетей не является новой задачей [23, 24]. В качестве меры надёжности рассматривается гиперсетевого аналог двухтерминальной надёжности, при условии, что в первичной сети происходят сбои, а узлы во вторичной сети должны быть надёжно соединены. В этом случае мы проектируем инженерную сеть, в которой каждый потребитель должен быть связан с необходимыми поставщиками с вероятностью не менее заданного порога надёжности  $0 < R \leq 1$ . Для решения этой проблемы используем методом алгоритма колонии муравьёв. В отличие от существующих методов оптимизации предлагаемый метод позволяет получить оптимальный вариант размещения инженерной сети на заданной территории по критерию «надёжность функционирования будущей сети и минимальность затрат на её строительство и эксплуатацию».

Как правило, для моделирования систем сетевой структуры с ненадёжными элементами используют аппарат случайных графов, а надёжность сети определяется как некоторая мера связности случайного графа. Наиболее распространенным показателем сетевой надёжности является вероятность связности сети, т. е. вероятность того, что все узлы в сети могут устанавливать соединение друг с другом. Задача расчета вероятности связности сети NP

трудна [25]. Тем не менее, можно осуществлять расчет и делать достоверные оценки надежности для сетей с использованием современных высокопроизводительных суперкомпьютеров [26–28], а также принимая во внимание некоторые особенности реальных сетевых структур [29–31].

Еще одна хорошо известная мера надёжности сети – это двухтерминальная надёжность, т. е. вероятность связности двух выделенных узлов сети (терминалов) [29]. Средняя парная связность [30, 31] представляет собой среднюю двухтерминальную надёжность сети среди всех пар узлов. Этот показатель описывает надёжность сети с точки зрения соединения между двумя произвольными узлами, даже если сеть в целом не связна.

Будем считать, что ветви (ребра первичной сети) подвержены случайным отказам, происходящим независимо друг от друга с заданными вероятностями  $p_i$ ,  $1 \leq i \leq g$ .

Надёжность ребра вторичной сети  $r \in R$  определим как

$$R_r(HN) = \prod_{v \in F(r)} p(v).$$

Если для ребра  $r \in R$  путь  $F(r)$  имеет конечные точки  $a$  и  $b$  и никакие другие рёбра не связывают эти точки, мы будем использовать обозначение  $R_{ab}(HN)$  вместо  $R_r(HN)$ . Если для узлов  $a$  и  $b$  существует более одного такого ребра, это обозначение  $R_{ab}(HN)$  используется для того ребра, значение надёжности которого максимально. Однако в рассматриваемой задаче (1) требуется соединить поставщиков с потребителями с минимальной стоимостью, поэтому нас не интересуют подобные случаи как приводящие к дорогим и заведомо неоптимальным решениям.

Введем в рассмотрение меру надёжности  $R(HN)$  для гиперсети  $HN$  в целом, с учетом того, что в первичной сети происходят сбои, но при этом все потребители должны быть связаны с необходимыми им поставщиками:

$$R(HN) = \min\{R_{ab}(HN)\}, \quad a \in Y_{source}, \quad b \in Y_{station}.$$

Таким образом,  $R(HN)$  является минимумом среди всех двухтерминальных надёжностей  $R_{ab}(HN)$ , где  $b$  – это перерабатывающий пункт,  $a$  – источник ресурса.

Основываясь на ранее описанном двухэтапном алгоритме, мы предлагаем новый алгоритм прокладки трубопроводов между заданными точками на графе первичной сети с ограничением на их надёжность. Предполагается, что задан порог надёжности  $0 < R_0 \leq 1$ . Задача состоит в том, чтобы построить гиперсеть  $HN$  минимальной стоимости и при этом достаточно надёжную, т. е. с условием  $R(HN) > R_0$ .

#### Алгоритм муравьиной колонии

В случае ограничения на надёжность удобно использовать алгоритм муравьиной колонии [32]. Для каждого ребра мы создаем муравьев, действующих по следующим правилам:

- вероятность перехода муравья в следующую вершину на итерации  $t$  определяется как:

$$P_{ij}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [v_{ij}]^\beta}{\sum [\tau_{ij}(t)]^\alpha [v_{ij}]^\beta};$$

- каждый муравей  $l_i$  ( $0 < l < L$ ) имеет метку TimeToLive  $TTL(l_i)$ :

$$TTL(l_i) = \prod_{v \in Path(l_i)} p(v),$$

где  $Path(l_i)$  – это путь для муравья  $l_i$ . При этом если  $TTL(l_i) < R_0$ , то муравей  $l_i$  умирает.

- для каждого ребра муравей откладывает феромон на каждой ветви  $\Delta\tau_{ij}(t) = Q/length(t)$ ;
- в наборе наиболее частых маршрутов находится и фиксируется минимум, стоимость ветвей первичной сети уменьшается.

#### Численные эксперименты

На рис. 2 представлены численные результаты предложенного алгоритма. Для надёжности были заданы следующие значения:  $p_i = 0,99$ ,  $1 \leq i \leq g$ ,  $R_0 = 0,9$ . В качестве графа первичной сети  $PN$  взята сетка размерности  $10 \times 10$ . Параметры алгоритма муравьиной колонии следующие:  $\alpha = 1$ ;  $\beta = 3$ ;  $\tau_0 = 1$ ;  $q = 50$ .

Количество ребер в  $SN$  для укладки в  $PN$  варьировалось от 10 до 100 (ось абсцисс на рис. 2).

Ось ординат – стоимость прокладки гиперсети  $Q(HN)$ . Сравнивались результаты работы «жадного» алгоритма и алгоритма муравьиной колонии. Из рисунка видно, что муравьиный алгоритм дает лучший результат для небольшого числа ребер. Когда ребер много, результаты работы алгоритмов почти одинаковы. Однако при этом алгоритм Флойда находит решение значительно быстрее.

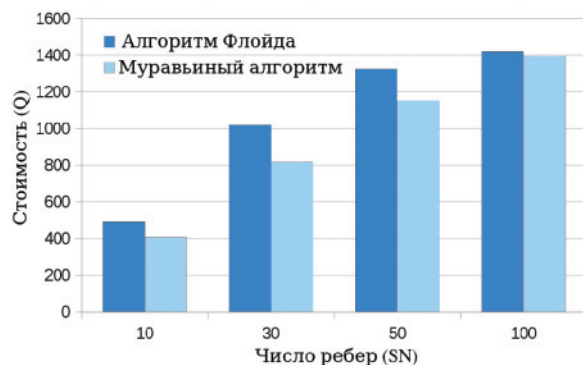


Рис. 2. Численные результаты: стоимость для решетки  $10 \times 10$  для количества ребер от 10 до 100

Fig. 2. Numerical results: costs for  $10 \times 10$  grid, the number of edges from 10 up to 100

#### Заключение

Изучен новый подход к проектированию магистрального трубопровода для доставки и переработки георесурсов. В отличие от классических моделей, в предложенной модели мы рассматриваем природно-техническую систему «земельный уча-

сток – магистральный трубопровод» в рамках одной математической модели. Как результат – предлагается новый метод нахождения маршрутов для прокладки трубопроводов между источниками георесурсов и пунктами их переработки с минимизацией затрат на укладку и техническое обслуживание с учетом заданных ограничений. Этот метод позволяет найти решение с учетом совместимости различных типов ресурсов для размещения их в одной и той же трассе.

Для обеспечения надежности проектируемой сети предлагается метод получения не только де-

шевого решения, но и достаточно надежного по отношению к заданному порогу, при условии, что сбои происходят в первичной (физической) сети. В качестве показателя надежности рассматривается минимум среди всех парных вероятностей связности между каждым перерабатывающим пунктом и соответствующим источником. Приведенные численные эксперименты показывают применимость предложенных методов.

*Работа поддержана Программой фундаментальных исследований ИВМиМГ СО РАН № 0315–2016–0006 и проектом РФФИ № 18–07–00460*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов П.В. Предварительные результаты ревизии минерально-сырьевой базы опал-кристаллитовых пород в среднем Зауралье // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 28–37.
2. Полубоярцев Е.Л., Благосвисный П.В., Исупова Е.В. Трубопроводный транспорт нефти и газа. – Ухта: УГТУ, 2014. – 39 с.
3. Network Design and Cost Optimization for Label Switched Multilayer Photonic IP Networks / S. Kaneda, T. Uyematsu, N. Nagatsu, K. Sato // J. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2005. – V. 23 (8). – P. 1612–1619.
4. Belotti P., Malucelli F. Row-Column Generation for Multilayer Network Design // Int. Network Optimization Conf. – Lisbon, Portugal, 2005. – P. 422–427.
5. Лотарев Д.Т. Неформальные описательные модели транспортных коммуникаций, транспортных сетей и территорий в задаче о прокладке путей и коммуникаций // Труды ИСА РАН. – 2009. – Т. 46. – С. 259–273.
6. Мелькумов В.Н., Кузнецов И.С., Кузнецов Р.Н. Определение оптимального маршрута трассы газопровода на основе карт стоимости влияющих факторов // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2009. – № 1 (13). – С. 21–27.
7. Забудский Г.Г., Веремчук Н.С. Алгоритм приближенного решения задачи Вебера на линии с запрещенными зонами // Дискретн. анализ и исслед. опер. – 2016. – Т. 23. – № 1. – С. 82–96.
8. Davydov I., Kochetov Y., Dempe S. Local search approach for the competitive facility location problem in mobile networks // International Journal of Artificial Intelligence. – 2018. – V. 16 (1). – P. 130–143.
9. Сарычев Д.С. Современные информационные системы для инженерных сетей // Вестник ТГУ. – 2003. – № 280. – С. 358–361.
10. Скворцов А.В. Разработка геоинформационных и инженерных систем на факультете информатики и в ООО «Индорсофт» // Вестник ТГУ. – 2003. – № 280. – С. 346–349.
11. Бойков В.Н., Шумилов Б.М. Сплайны в трассировании автомобильных дорог. – Томск: ЦНТИ, 2001. – 164 с.
12. Лемперт А.А. Математическая модель и программная система для решения задачи размещения логистических объектов / А.А. Лемперт, А.Л. Казаков, Д.С. Бухаров // Управление большими системами. – 2013. – № 41. – С. 270–284.
13. Косяков С.В., Новосельцева С.С., Садыков А.М. Мягкие вычисления в построении карт зонирования территорий по параметрам систем энергоснабжения // Состояние и перспективы развития электротехнологии: материалы международной научно-технической конференции. – Иваново, 2013. – С. 338–341.
14. Прилуцкий М.Х., Афраймович Л.Г. Распределение ресурсов в иерархических системах транспортного типа. – Нижний Новгород, 2007. – 80 с.
15. Ерзин А.И., Кочетов Ю.А. Задачи маршрутизации. – Новосибирск, 2014. – 95 с.
16. Poullovassilis A., Levene M. A Nested-Graph Model for the Representation and Manipulation of Complex Objects // J. ACM Trans. Inf. Syst. – 1994. – V. 12. – P. 35–68.
17. Kuran M., Thiran P. Layered Complex Networks // J. Phys. Rev. Lett. – 2006. – V. 96. – 138701–1–138701–4.
18. Попков В.К. О моделировании городских транспортных систем гиперсетями // Автоматика и телемеханика. – 2011. – Т. 72. – № 6. – С. 179–189.
19. Sokolova O.D., Yurgenson A.N. Using Graph, Hypergraph and Hypernet Models for Network Analysis Problems // 7<sup>th</sup> IEEE Forum on Strategic Technology. – Tomsk, 2012. – P. 1–4.
20. Toktoшов G.Y., Monakhov O.G. Models and Algorithms of Evolutionary Synthesis for Optimization of Engineering Networks // Proc. of International Multi Conference on Engineering, Computer and Information Sciences. IEEE SIBIRCON-2017. – Novosibirsk, Russia, 2017. – P. 167–171.
21. Toktoшов G.Y., Yurgenson A.V., Migov D.A. Design of Utility Network Subject to Reliability Constraint // Proc. of International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences. IEEE SIBIRCON-2017. – Novosibirsk, Russia, 2017. – P. 172–175.
22. СНиП 2.07.01–89\* Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. – М.: Горстрой, 2016. – 89 с.
23. Rodionov A.S., Rodionova O.K. Random Hypernets in Reliability Analysis of Multilayer Networks // J. Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2015. – V. 343. – P. 307–315.
24. Rodionov A.S., Rodionova O.K. Using Random Hypernets for Reliability Analysis of Multilevel Networks // 1st Int. Conf. on Mathematical Methods and Computational Techniques in Science and Engineering (MMCTSE 2014). Ser. Mathematical Methods in Science and Engineering. – Athens, Greece, 2014. – P. 119–121.
25. Colbourn Ch.J. The Combinatorics of Network Reliability. – New York: Oxford University Press, 1987. – 160 p.
26. Martinez S.P., Calvino B.O., Rocco S.C.M. All-Terminal Reliability Evaluation through a Monte Carlo Simulation Based on an MPI Implementation // European Safety and Reliability Conference: Advances in Safety, Reliability and Risk Management (PSAM 2011/ESREL 2012). – Helsinki, 2012. – P. 1–6.
27. Migov D.A., Rodionov A.S. Parallel Implementation of the Factoring Method for Network Reliability Calculation // ICCSA-2014. LNCS. – Heidelberg: Springer, 2014. – V. 8584 (4). – P. 654–664.
28. Nesterov S.N., Migov D.A. Parallel Calculation of Diameter Constrained Network Reliability // PACT-2017. LNCS. – Heidelberg: Springer, 2017. – V. 10421. – P. 473–479.
29. Shooman A.M., Kershenbaum A. Exact Graph-Reduction Algorithms for Network Reliability Analysis // IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM '91. – New York: IEEE Press, 1991. – P. 1412–1420.

30. Rodionov A.S. Cumulative Estimated Values of Structural Networks Reliability Indices and their Usage // IEEE Conf. on Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. – Omsk, Russia: IEEE Press, 2016. – P. 1–4.
31. Родионов А.С. Кумулятивные оценки показателей структурной надежности сети и их использование // Проблемы информатики. – 2017. – № 34. – С. 15–24.
32. Dorigo M. Swarm Intelligence, Ant Algorithms and Ant Colony Optimization // Reader for CEU Summer University Course «Complex System». – Budapest, Central European University, 2001. – P. 1–38.

*Поступила 08.11.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Токтошов Г.Б.**, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории системного моделирования и оптимизации Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

**Юргенсон А.Н.**, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории системного моделирования и оптимизации Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

**Мигов Д.А.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории системного моделирования и оптимизации Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

UDC 519.17: 621.644.07

## OPTIMIZATION OF ROUTES FOR LAYING TRUNK PIPELINE TO TRANSPORT GEO-RESOURCES

Gulzhigit Y. Toktoshov<sup>1</sup>,  
tgi\_tok@rambler.ru

Anastasiya N. Yurgenson<sup>1</sup>,  
nastya@rav.sccc.ru

Denis A. Migov<sup>1</sup>,  
mdinka@rav.sccc.ru

<sup>1</sup> Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS,  
6, Academician Lavrentyev avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the research is caused by necessity to transport geo-resources from extraction sites to processing sites for further distribution of different resources among consumers. In this regard, the task of choosing the routes for laying a trunk pipeline to transport geo-resources from extraction sites to processing sites is relevant. At the same time, it is necessary to provide a minimum spending (capital investment and operating costs) and reliability of the trunk pipeline operation in conditions of unforeseen natural and technogenic impacts.

**The main aim** of the research is to propose a new method for laying a trunk pipeline, taking into account the compatibility or incompatibility of different geological resources types for laying in the same technical corridor, as well as a reliability of a trunk pipeline.

**Object:** trunk pipeline laying on a given area.

**Methods:** methods of graph theory and theory of hypernets; methods of evolutionary synthesis; computer simulation of geo-resources transportation; discretization of the trunk pipeline location area.

**Results.** The authors have proposed a new mathematical apparatus based on the hypernet theory, taking into account the hierarchy of the structure of a designed trunk pipeline. On the basis of the hypernet approach, a new method for laying a trunk pipeline is obtained, taking into account the incompatibility of different types of resources for laying in the same technical corridor. A two-stage method is developed for designing a trunk pipeline ensuring minimum capital investment and operating costs. In addition, the authors developed a modified ant colony algorithm which provides not only a cheap solution, but reliable enough with respect to a given threshold in assumption that failures occur in the primary (physical) network. As a measure of reliability we consider the minimum among all pair probabilities of connectivity between each processing point and the corresponding source. The numerical experiments show the applicability of the methods proposed.

### Key words:

Geo-resources, area of location, transportation of geo-resources, trunk pipeline, graph, hypernet, primary network, secondary network, network reliability, evolutionary algorithms.

The research was supported by the Basic Research Program of the ICMMG SB RAS No. 0315–2016–0006 and the RFBR project No. 18–07–00460.

### REFERENCES

1. Smirnov P.V. Preliminary results of the revision of the mineral resource base of opal-cristobalite rocks in the Middle Trans-Urals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 28–37. In Rus.
2. Poluboyartsev E.L., Blagovisny P.V., Isupova E.V. *Truboprovodny transport nefti i gaza* [Pipeline transportation of oil and gas]. Ukhta, UGTU Publ., 2014. 39 p.
3. Kaneda S., Uyematsu T., Nagatsu N., Sato K. Network Design and Cost Optimization for Label Switched Multilayer Photonic IP Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2005, vol. 23 (8), pp. 1612–1619
4. Belotti P., Malucelli F. Row-Column Generation for Multilayer Network Design. *Int. Network Optimization Conf.* Lisbon, Portugal, 2005. pp. 422–427.
5. Lotarev D.T. Neformalnye opisatelnye modeli transportnykh kommunikatsiy, transportnykh setey i territoriy v zadache o prokladke putey i kommunikatsiy [Unformal Descriptive Models of Transport Communications, Transport Networks and Territory in the Problem of Construction of Ways and Communications]. *Trudy instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Institute of Informatics Systems of the Russian Academy of Sciences]. Moscow, 2009. Vol. 46, pp. 259–273.
6. Melkumov V.N., Kuznetsov I.S., Kuznetsov R.N. Determination of the Optimal Route of the Gas Pipeline on the Basis of the Factors Affecting the Value of Cards. *Construction and Architecture*, 2009, vol. 1 (13), pp. 21–27. In Rus.
7. Zabudskii G.G., Veremchuk N.S. An algorithm for finding an approximate solution to the Weber problem on a line with forbidden gaps. *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 82–96. In Rus.
8. Davydov I., Kochetov Y., Dempe S. Local search approach for the competitive facility location problem in mobile networks. *International Journal of Artificial Intelligence*, 2018, vol. 16 (1), pp. 130–143.
9. Sarychev D.S. Modern Information Systems for Utility Networks. *Bulletin of Tomsk State University*, 2003, no. 280, pp. 358–361. In Rus.
10. Skvortsov A.V. Development of Geographic Information and Utility Systems at the Faculty of Informatics in Ltd. «Indorsoft». *Bulletin of Tomsk State University*, 2003, no. 280, pp. 346–349. In Rus.
11. Boikov V.N., Shumilov B.M. *Splayny v trassirovanii avtomobilnykh dorog* [Splines in Routing of Roads]. Tomsk, TsNTI Publ., 2001. 164 p.
12. Lempert A.A., Kazakov A.A., Bukharov D.S. Mathematical Model and Software System for the Solution of Location Problems of

- Logistics Objects. *Management of big systems*, 2013, no. 41, pp. 270–284. In Rus.
13. Kosyakov S.V., Novoseltseva S.S., Sadykov A.M. Myagkie vychisleniya v postroenii kart zonirovaniya territoriy po parametram sistem energosnabzheniya [Soft Computing in Mapping Zoning by Parameters of Power Supply Systems]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [International scientific-technical conference. State and prospects of development of electrotechnology]. Ivanovo, 2013. pp. 338–341.
14. Prilutskiy M.Kh., Afraymovich L.G. *Raspredelenie resursov v ierarhicheskikh sistemakh transportnogo tipa* [Distribution of resources in transport-type hierarchical systems]. Nizhny Novgorod, 2007. 80 p.
15. Erzin A.I., Kochetov Yu.A. *Zadachi marshrutizatsii* [Routing problems]. Novosibirsk, 2014. 95 p.
16. Poulouvassilis A., Levene M. A Nested-Graph Model for the Representation and Manipulation of Complex Objects. *ACM Trans. Inf. Syst.*, 1994, vol. 12, pp. 35–68.
17. Kurant M., Thiran P. Layered Complex Networks. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, vol. 96, pp. 138701–1–138701–4.
18. Popkov V.K. On Modeling City Traffic Systems with Hypernetworks. *Automation and Remote Control*, 2011, vol. 72 (6), pp. 179–189. In Rus.
19. Sokolova O.D., Yurgenson A.N. Using Graph, Hypergraph and Hypernet Models for Network Analysis Problems. *7<sup>th</sup> IEEE Forum on Strategic Technology*. Tomsk, 2012. pp. 1–4.
20. Toktoshov G.Y., Monakhov O.G. Models and Algorithms of Evolutionary Synthesis for Optimization of Engineering Networks. *Proc. of International Multi Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, IEEE SIBIRCON-2017*. Novosibirsk, Russia, 2017. pp. 167–171.
21. Toktoshov G.Y., Yurgenson A.V., Migov D.A. Design of Utility Network Subject to Reliability Constraint. *Proc. of International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences, IEEE SIBIRCON-2017*. Novosibirsk, Russia, 2017. pp. 172–175.
22. SNiP 2.07.01–89\*. *Gradostroitelstvo. Planirovka i zastroyka gorodskikh i selskikh poseleniy* [Building Norms and Rules 2.07.01–89\*. Urban Development Planning and development of urban and rural settlements]. Moscow, Gostroy, 2016. 89 p.
23. Rodionov A.S., Rodionova O.K. Random Hypernets in Reliability Analysis of Multilayer Networks. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2015, vol. 343, pp. 307–315.
24. Rodionov A.S., Rodionova O.K. Using Random Hypernets for Reliability Analysis of Multilevel Networks. *1<sup>st</sup> Int. Conf. on Mathematical Methods and Computational Techniques in Science and Engineering (MMCTSE 2014). Ser. Mathematical Methods in Science and Engineering*. Athens, Greece, 2014. pp. 119–121.
25. Colbourn Ch.J. *The Combinatorics of Network Reliability*. New York, Oxford University Press, 1987. 160 p.
26. Martinez S.P., Calvino B.O., Rocco S.M. All-Terminal Reliability Evaluation through a Monte Carlo Simulation Based on an MPI Implementation. *European Safety and Reliability Conference: Advances in Safety, Reliability and Risk Management (PSAM 2011/ESREL 2012)*. Helsinki, 2012. pp. 1–6.
27. Migov D.A., Rodionov A.S. Parallel Implementation of the Factoring Method for Network Reliability Calculation. *ICCSA-2014. LNCS*. Heidelberg, Springer, 2014. Vol. 8584 (4), pp. 654–664.
28. Nesterov S.N., Migov D.A. Parallel Calculation of Diameter Constrained Network Reliability. *PACT-2017. LNCS*. Heidelberg, Springer, 2017. Vol. 10421, pp. 473–479.
29. Shooman A.M., Kershenbaum A. Exact Graph-Reduction Algorithms for Network Reliability Analysis. *IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM' 91*. New York, IEEE Press, 1991. pp. 1412–1420.
30. Rodionov A.S. Cumulative Estimated Values of Structural Networks Reliability Indices and their Usage. *IEEE Conf. on Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. New York, IEEE Press, 2016. pp. 1–4.
31. Rodionov A.S. Cumulative Estimated Values of Structural Networks Reliability Indices and their Usage. *Problems of informatics*, 2017, no. 34, pp. 15–24. In Rus.
32. Dorigo M. Swarm Intelligence, Ant Algorithms and Ant Colony Optimization. *Reader for CEU Summer University Course «Complex System»*. Budapest, 2001. pp. 1–38.

Received: 8 November 2018.

#### Information about the authors

**Gulzhigit Y. Toktoshov**, Cand. Sc., researcher, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS.

**Anastasiya N. Yurgenson**, Cand. Sc., researcher, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS.

**Denis A. Migov**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of SB RAS.

УДК 621.31

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ И АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ ОТ ИМПУЛЬСНЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НАПРЯЖЕНИЕМ 6–10 кВ НЕФТЯНЫХ ПРОМЫСЛОВ

Сидоров Сергей Владимирович<sup>1</sup>,  
sidorovsv@tyuiu.ru

Сушков Валерий Валентинович,  
sushkovvv@gray-nv.ru

Сухачев Илья Сергеевич,  
suhachevis@tyuiu.ru

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет,  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

<sup>2</sup> Нижневартковский государственный университет,  
Россия, 628600, г. Нижневартковск, ул. Ленина, 56.

**Актуальность.** Одной из основных причин высокой аварийности и отключений в распределенных системах электроснабжения 6–10 кВ нефтяных промыслов являются перенапряжения вследствие грозовых воздействий. Подавляющее количество грозовых отключений в распределительных сетях 6–10 кВ, связанных с перенапряжениями, обусловлено недостаточным уровнем импульсной прочности линейной изоляции, которое приводит к перекрытию изоляторов и в дальнейшем к обесточиванию нефтепромысловых потребителей. Для обеспечения требуемой грозоупорности распределенной системы электроснабжения нефтяных промыслов различными способами устанавливается защитное оборудование: ограничители перенапряжений, разрядники различных видов. При этом защитная аппаратура изменяет электрические характеристики распределительной сети, что влияет на характеристики переходных процессов при грозовых воздействиях. Следовательно, необходимо провести оценку влияния наиболее часто применяемых защитных аппаратов на перенапряжения в распределенной системе электроснабжения нефтяных промыслов при грозовых воздействиях.

**Цель:** оценить влияние защитного оборудования на уровни перенапряжений в электрических сетях 6(10) кВ нефтегазодобывающего предприятия при грозовых воздействиях.

**Методы.** Проведена оценка влияния защитной аппаратуры на уровни перенапряжений путем анализа переходного процесса и частотных характеристик для участка системы электроснабжения на грозовое воздействие с использованием алгоритмов пакета Linear Analysis Tools в MATLAB Simulink.

**Результаты.** Установлена зависимость уровня перенапряжений от вида защитных аппаратов. Получены частотные и временные характеристики входных перенапряжений потребителей, которые необходимо знать при выборе защитной аппаратуры. Определена зависимость резонансных частот от установленных искровых разрядников. Разработана в среде MATLAB Simulink схема имитационной модели типового участка распределенной системы электроснабжения нефтегазодобывающего предприятия Западной Сибири, включая модели ограничителя перенапряжений, разрядника и грозового импульса. Предложены мероприятия по защите нефтепромысловых потребителей от импульсных перенапряжений.

### Ключевые слова:

Нефтяной промысел, воздушная линия электропередачи, нелинейный ограничитель перенапряжения, разрядник, импульсные перенапряжения, параметры перенапряжений, имитационное моделирование, частотный анализ, переходные процессы.

### Введение

В настоящее время в распределенной системе электроснабжения нефтегазодобывающих предприятий Западной Сибири высокая аварийность, достигающая 40 % от общего числа отключений, обусловлена воздействием на электрооборудование импульсных, в частности грозовых, перенапряжений [1, 2].

В нефтепромысловых электрических сетях напряжением 6(10) кВ для повышения грозоупорности устанавливают нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) и разрядники в местах, рекомендуемых нормативными документами. Подавляющее количество грозовых воздействий в распределительных сетях напряжением 6(10) кВ приходится на воздушную линию электропередачи (ЛЭП), при этом к самому тяжелому случаю относится прямой удар молнии в провод [3].

Для снижения уровней грозовых перенапряжений в большинстве случаев разрядники устанавливают на опорах ЛЭП, а ОПН – на подходах трансформаторных подстанций (ТП) 35/6(10) и 6(10)/0,4 кВ и в их распределительных устройствах [4–6]. Отказы электрооборудования, возникающие при грозовых перенапряжениях, приводят к перекрытию и повреждению изоляции электроустановок и простою технологического оборудования [1, 2, 7], поэтому задача оценки влияния различных способов и аппаратов защиты на величину импульсных перенапряжений в электрической сети актуальна. Научно-практический интерес представляет выбор количества и места установки ОПН и разрядников в электрических сетях напряжением 6(10) кВ нефтегазодобывающих предприятий [8–13].

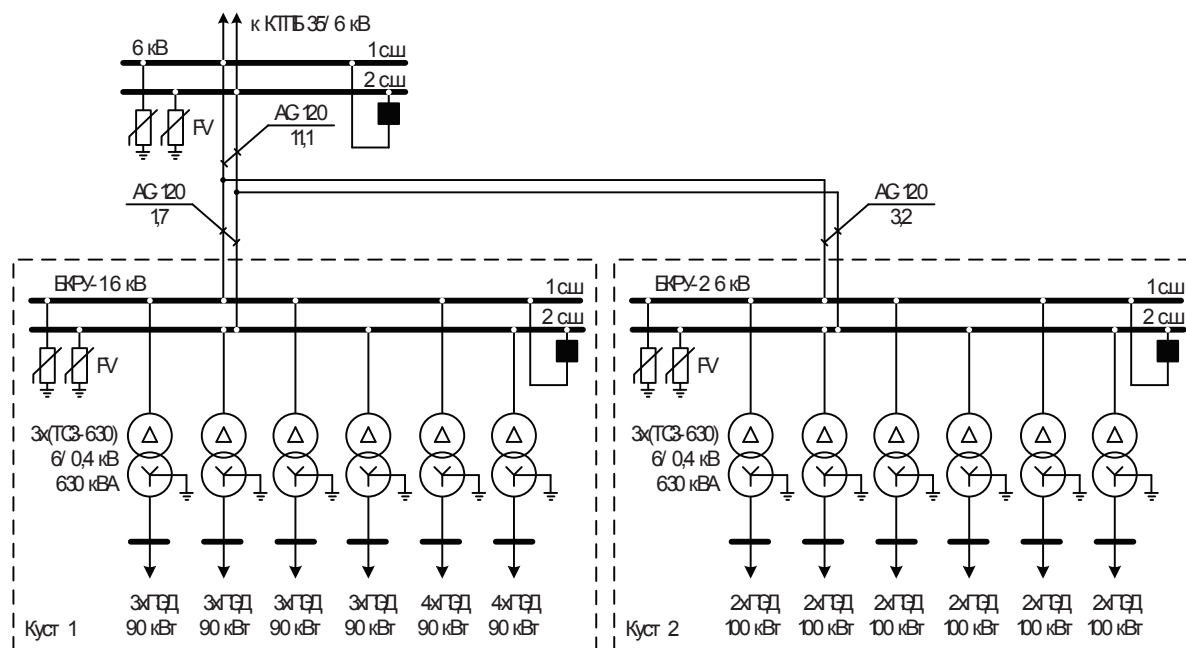


Рис. 1. Принципиальная схема участка распределительной сети электроснабжения кустов нефтедобывающих скважин

Fig. 1. Schematic diagram of oil producing wells power distribution network section

### Объект и методы исследования

В качестве объекта исследования принят участок распределительной сети с изолированной нейтралью напряжением 6 кВ нефтяного месторождения Западной Сибири. На рис. 1 приведена схема электроснабжения по двум секциям шин 6 кВ двух кустов нефтедобывающих скважин, получающих питание от блочных комплектных распределительных устройств БКУ-1, двух трансформаторных подстанций 6/0,4 кВ, подключенных воздушными линиями электропередачи к блочной комплектной трансформаторной подстанции КТПБ 35/6 кВ. Нелинейные ограничители перенапряжений установлены на шинах 6 кВ. Длинноискровые разрядники установлены на опорах типа ПС10П-27М воздушной линии электропередачи.

Согласно принципиальной схеме электроснабжения с целью определения перенапряжений вдоль воздушной линии электропередачи вследствие воздействия грозового импульса разработана в программной среде MATLAB Simulink имитационная модель типового участка распределительной сети электроснабжения кустов нефтедобывающих скважин предприятия Западной Сибири, схема которой приведена на рис. 2.

При разработке имитационной модели приняты следующие допущения:

1. Секционные выключатели БКУ 1 и 2 отключены, секции шин 6 кВ работают независимо, и питание осуществляется по одному вводу 6 кВ КТПБ 35/6 кВ.
2. Параметры трехфазной симметричной нагрузки трансформаторов ТСЗ-630 6/0,4 кВ приведены к напряжению распределительной сети электроснабжения напряжением 6 кВ [14, 15].

3. Параметры воздушных линий электропередачи напряжением 6 кВ – тип опоры, марка провода, величина провеса провода – одинаковы по всей длине участка.

Модель характеризуется следующими особенностями:

1. ОПН и искровые разрядники моделируются нелинейными резисторами с соответствующими вольтамперными характеристиками [16].
2. В нормальном рабочем режиме разрядник моделируется емкостью на землю, в режиме пробоя – переходным сопротивлением.
3. При построении частотных характеристик емкость разрядников учитывается соответствующим пересчетом емкости на землю воздушной линии.

Имитационная модель позволяет рассчитать временные и частотные характеристики импульсных перенапряжений и токов в произвольных точках воздействия грозового импульса на распределительную сеть электроснабжения напряжением 6 кВ. На рис. 2 воздействие грозового импульса приходится в точку распределительной сети, отстоящую на расстояния X и Y от начала отходящей линии до БКУ-1 соответственно. Каждый участок распределительной сети электроснабжения представлен имитационной моделью трехфазной линии с распределёнными параметрами.

Согласно ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010 и СО 153-34.21.122-2003, разработана имитационная модель грозового импульса, схема которой приведена на рис. 3.

Параметры имитационной модели участка распределительной сети электроснабжения кустов нефтедобывающих скважин приведены в таблице.

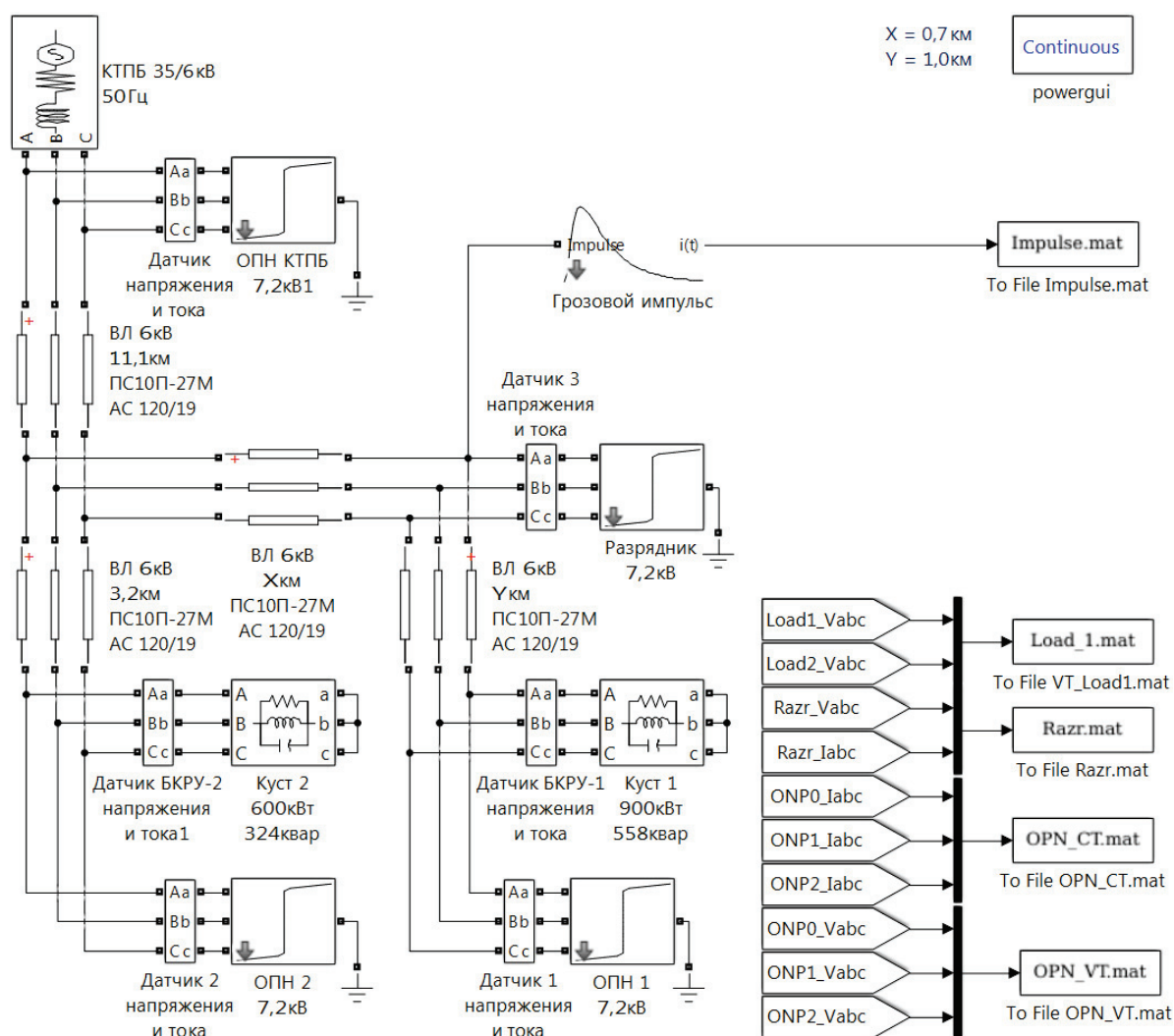


Рис. 2. Схема имитационной модели участка распределительной сети электроснабжения кустов нефтяных скважин

Fig. 2. Simulation model of oil producing wells power distribution network section

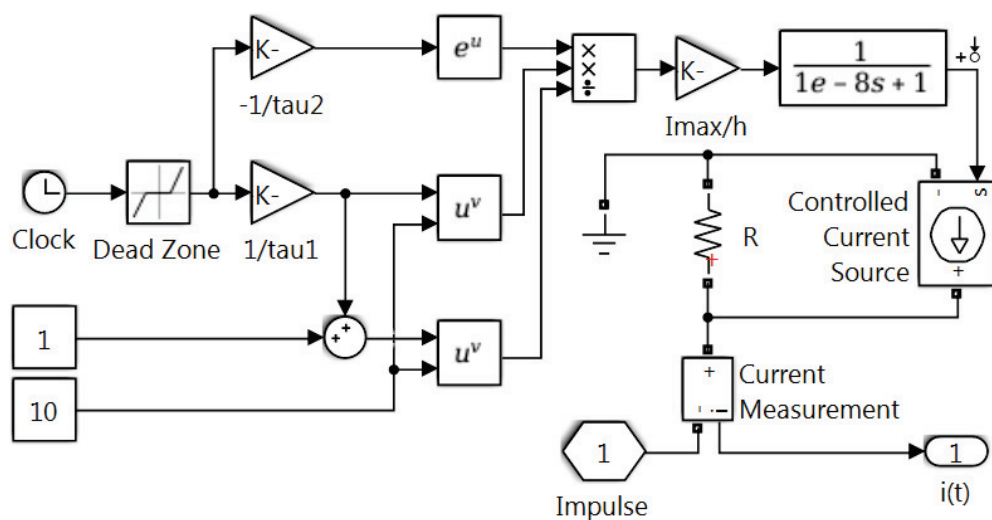


Рис. 3. Схема имитационной модели грозового импульса

Fig. 3. Simulation model of lightning impulse

**Таблица.** Параметры имитационной модели участка распределительной сети электроснабжения кустов нефтедобывающих скважин

**Table.** Parameters of simulation model of oil producing wells power distribution network section

| Наименование блока<br>Block Name                 | Параметры<br>Parameters                                                                                           | Значения<br>Values |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Источник питания<br>ИПП<br>Three-Phase Source    | Линейное напряжение, кВ<br>Phase-to-phase voltage, kV                                                             | 6,3                |
|                                                  | Частота, Гц<br>Frequency, Hz                                                                                      | 50                 |
|                                                  | Активное сопротивление, Ом<br>Source resistance, Ohms                                                             | 0,8929             |
|                                                  | Индуктивность, мГн<br>Source inductance, mH                                                                       | 16,58              |
| Воздушная линия<br>6 кВ<br>Three-Phase Line 6 kV | Сопротивления прямой и нулевой последовательностей фаз, Ом/км<br>Positive- and zero-sequence resistances, Ohms/km | 0,24929<br>0,39534 |
|                                                  | Индуктивности прямой и нулевой последовательностей фаз, мГн/км<br>Positive- and zero-sequence inductances, mH/km  | 1,2015<br>5,0511   |
|                                                  | Емкости прямой и нулевой последовательностей фаз, нФ/км<br>Positive- and zero-sequence capacitances, nF/km        | 9,6699<br>4,7011   |
| Потребители 1, 2<br>Load 1, 2                    | Активное сопротивление, Ом<br>Source resistance, Ohms                                                             | 400 360            |
|                                                  | Индуктивность, Гн<br>Source inductance, H                                                                         | 2,0545<br>2,1231   |

Порядок расчета грозовых перенапряжений на имитационной модели заключается в следующем:

1. Параметры грозового воздействия приняты согласно ГОСТ Р МЭК 62305–1–2010 [17] и СО 153–34.21.122–2003 [18] и заносятся в блок *Грозовой импульс*  $i(t)$ .
2. Вычисляются параметры воздушных линий и заносятся в блоки *ВЛ 6 кВ*: основная частота, погонные сопротивления, индуктивности, емкости прямой и нулевой последовательностей, длина воздушной линии (или участка ВЛ) в зависимости от типа опоры, марки провода, провиса провода, удельного сопротивления грунта.
3. Принимаются параметры ОПН согласно паспортным данным: коэффициенты аппроксимации вольтамперной характеристики  $I(U)=I_{pr}(U/U_{pr})^\alpha$ , где  $U_{pr}$  – защитное напряжение,  $I_{pr}$  – опорный ток.

4. Принимаются параметры искровых разрядников: емкость искрового промежутка и коэффициенты аппроксимации вольтамперной характеристики.
5. Указываются параметры источника питания *ИП*: режим работы нейтрали, номинальные величины напряжения и частоты, величины внутреннего сопротивления и индуктивности.
6. Вычисляются параметры трехфазной симметричной нагрузки трансформаторов ТСЗ-630 6/0,4 кВ, приведенные к напряжению воздушной линии 6 кВ: величины активного сопротивления и индуктивности по номинальным значениям напряжения, частоты питающей сети, активной мощности нагрузки и коэффициента мощности.
7. Посредством Linear Analysis Tools производится построение амплитудно- и фазочастотных характеристик (Bode Diagram) импульсных перенапряжений исследуемого участка воздушной линии электропередачи распределительной сети, ограниченного входной Input Perturbation и выходной Output Measurements точками модели.
8. Вычисленные временные функции напряжений сохраняются модулем вывода информации в файл в виде массива данных.

Результаты моделирования приведены на рис. 4–7.

Изначально модель работает в нормальном установившемся режиме. Исследуем уровни перенапряжений на вводе БКРУ-1 6/0,4 кВ распределительной сети электроснабжения 6 кВ при возникновении грозового воздействия спустя 1 мс с начала моделирования. Осциллограмма максимально допустимого грозового импульса по I уровню защиты [18] приведена на рис. 4, а. В случае отсутствия нелинейных ограничителей перенапряжений и искровых разрядников осциллограмма линейных напряжений приведена на рис. 4, б, амплитуда которых составляет 2,8 МВ, что примерно в 200 раз превышает допустимое значение [19].

Согласно правилам устройств электроустановок, БКРУ комплектуется нелинейными ограничителями перенапряжений как по высокой стороне, так и по низкой. В этом случае уровень перена-

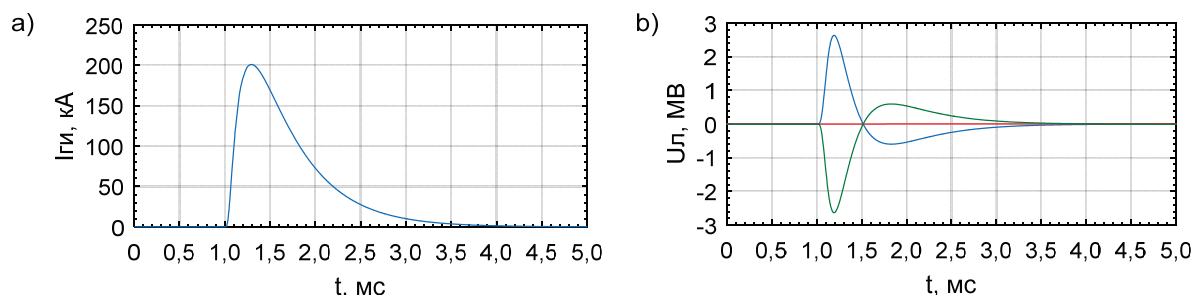


**Рис. 4.** Осциллограммы: а) грозового импульса; б) линейных напряжений на вводе БКРУ-1 6/0,4 кВ при отсутствии защитного оборудования

**Fig. 4.** Oscillograms of: а) lightning impulse; б) phase-to-phase voltage at the input block switchgear № 1 6/0,4 kV without protection devices

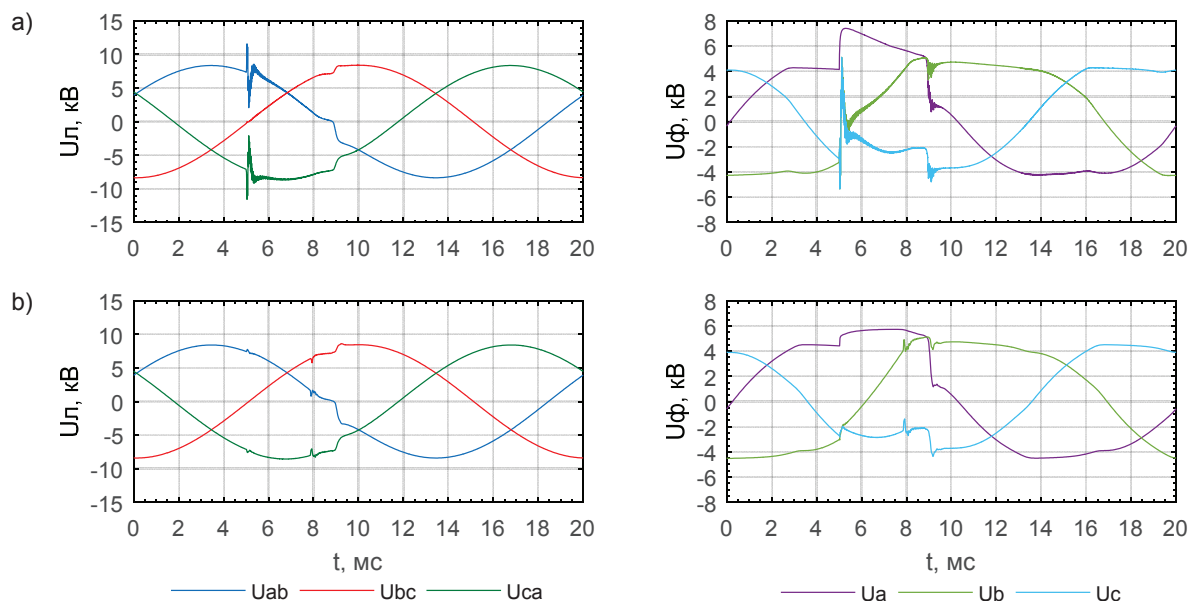


Рис. 5. Осциллограммы линейных напряжений на вводе БКРУ-1 6/0,4 кВ и фазных напряжений ОПН-1: а) при отсутствии разрядников вдоль ЛЭП 6 кВ; б) при установке разрядников вдоль ЛЭП 6 кВ

Fig. 5. Phase-to-phase voltage oscillograms at the input block switchgear № 1 6/0,4 kV and phase-to-ground voltage non-linear surge arrester: а) without arresters on the overhead power line 6 kV; б) with arresters on the overhead power line 6 kV

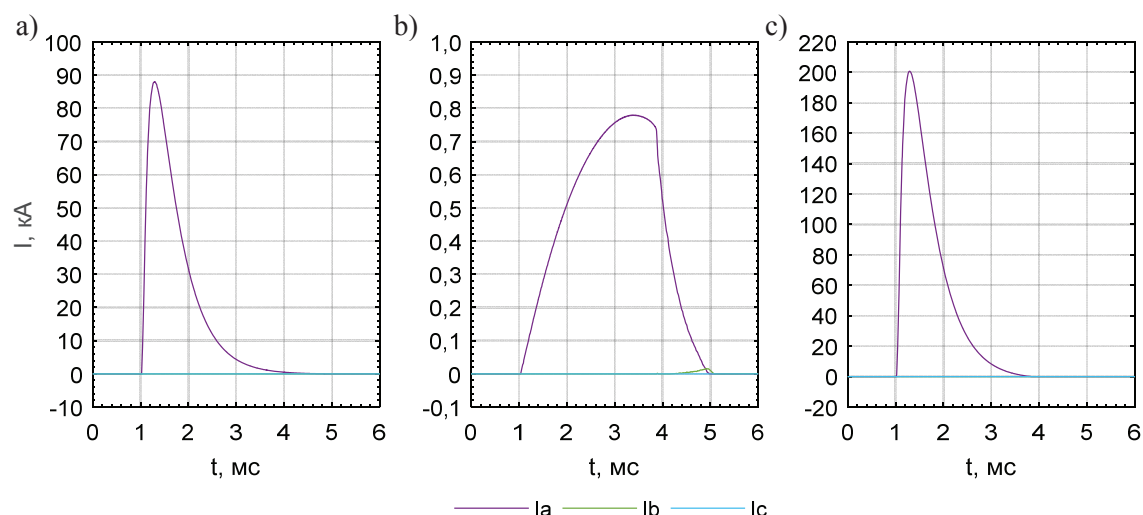


Рис. 6. Осциллограммы фазных токов ОПН без разрядников (а), с разрядниками (б); осциллограммы фазных токов разрядника вблизи места грозового воздействия (с)

Fig. 6. Phase-to-ground current oscillograms at the non-linear surge arrester without arresters (а), with arresters (б); phase-to-ground current oscillograms at the arrester near the place of lightning effects (с)

пряжения на вводе БКРУ-1 6/0,4 кВ снижается до 12,5 кВ, что в 1,5 раза превышает рабочие значения. Результаты моделирования приведены на рис. 5, а. На рис. 5, б получены осциллограммы при установке разрядников вдоль ЛЭП 6 кВ, при этом уровень перенапряжения не превышает 5 % рабочего напряжения, на 2 кВ снизилось перенапряжение на ОПН-1.

Осциллограммы фазных токов ОПН при наличии и отсутствии разрядников приведены на рис. 6, а, б, соответственно. Установка разрядни-

ков снижает амплитуду разрядного тока в 112 раз и увеличивает длительность разряда в 1,3 раза, что сокращает тепловую нагрузку на ОПН и увеличивает срок его эксплуатации [5, 20]. Осциллограмма фазных токов разрядника вблизи места грозового воздействия приведены на рис. 6, с.

Для оценки влияния защитных аппаратов на спектральный состав перенапряжений построены частотные характеристики, полученные инструментом MATLAB Simulink Linear Analysis Tool на рис. 7.

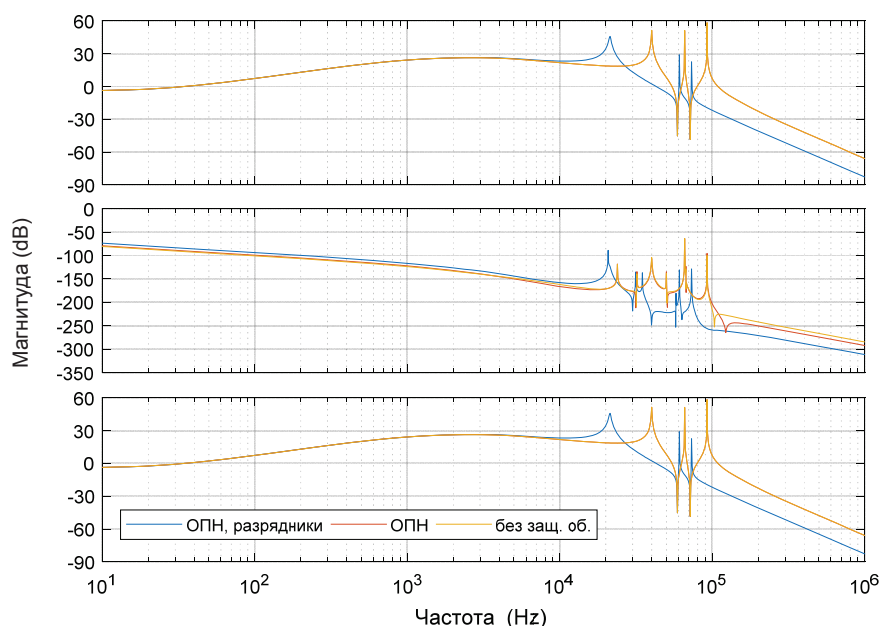


Рис. 7. Частотные характеристики импульсных перенапряжений на вводе БКРУ-1 6/0,4 кВ –  $U_{ab}^{\phi}$ ,  $U_{bc}^{\phi}$ ,  $U_{ca}^{\phi}$  соответственно  
Fig. 7. Frequency characteristics of impulse overvoltages on the input block switchgear № 1 6/0,4 kV –  $U_{ab}^{\phi}$ ,  $U_{bc}^{\phi}$ ,  $U_{ca}^{\phi}$  respectively

Полученные частотные характеристики  $U^{\phi}$  позволяют по известному спектру импульсного воздействия  $I_{impulse}(f)$  рассчитать величины перенапряжений  $U(f)$  на конце исследуемой воздушной линии распределенной энергосистемы:

$$U(f) = I_{impulse}(f) \cdot U^{(f)}.$$

Грозовое воздействие на линейный провод фазы А ЛЭП вызывает перенапряжение между фазами  $U_{ab}^{\phi}$ ,  $U_{ca}^{\phi}$  на вводе БКРУ-1.

При отсутствии разрядников наибольшие перенапряжения лежат в диапазоне частот 40–90 кГц. В случае установки разрядников на опоры ЛЭП наибольшие перенапряжения смещаются в диапазон 21–71 кГц, что необходимо учитывать при выборе вида защитных аппаратов, их количества и места установки.

#### Заключение

1. Применение ОПН ограничивает напряжение на вводе БКРУ-1 6/0,4 кВ на уровне, в 1,5 раза превышающем рабочие значения. Установка разрядников на опорах ЛЭП и ОПН на трансформаторных подстанциях 35/6 и 6/0,4 кВ снижает уровень перенапряжения до 5 % рабочего напряжения, что подтверждает правильность рекомендаций, приведенных в нормативных документах при условии исправного технического состояния электроустановок. Так, повышение на 20 % величины сопротивления заземления опор ЛЭП приводит к увеличению перенапряжения на линейной изоляции в три раза [13, 21–23].

торных подстанциях 35/6 и 6/0,4 кВ снижает уровень перенапряжения до 5 % рабочего напряжения, что подтверждает правильность рекомендаций, приведенных в нормативных документах при условии исправного технического состояния электроустановок. Так, повышение на 20 % величины сопротивления заземления опор ЛЭП приводит к увеличению перенапряжения на линейной изоляции в три раза [13, 21–23].

2. Установка разрядников на ЛЭП приводит к смещению максимальных перенапряжений в область более низких частот, что чревато пробоем линейной изоляции ЛЭП.
3. Для того чтобы перенапряжения не достигали опасных значений в широком диапазоне частот грозового импульса, необходимо проводить расчет по определению количества, места установки разрядников и ОПН с учетом их влияния на амплитудно-частотную характеристику питающего напряжения потребителей.

Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых (СП-829.2018.1).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка остаточного ресурса изоляции погружного электродвигателя установок электрических центробежных насосов добычи нефти при воздействиях импульсных перенапряжений / В.В. Сушков, В.В. Тимошкин, И.С. Сухачев, С.В. Сидоров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 10. – С. 74–80.
2. Устройство регистрации, идентификации перенапряжений и оценки остаточного ресурса изоляции погружных электродвигателей: пат. 2655948 Российская Федерация № 2017109534; заявл. 21.03.2017; опубл. 30.05.2018, Бюл. № 16. – 8 с.
3. Transient Voltage Measurements for Overhead Transmission Lines and Substations by Metal-Free and Contactless Integrated Electro-Optic Field Sensors / H. Wang, C. Zhuang, R. Zeng, S. Xie, J. He // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – V. 66. – № 1. – P. 571–579.
4. Ограничители перенапряжений для защиты изоляции электрооборудования и линий сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения от грозных и внутренних перенапряжений / Ф.Х. Халилов, В.Г. Гольдштейн, А.В. Колычев, В.П. Степанов, В.В. Титков. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 264 с.

5. Халилов Ф.Х., Евдокунин Г.А., Поляков В.С. Защита сетей 6–35 кВ от перенапряжений. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002. – 272 с.
6. Study of importance of line entrance arrester for a composite transmission circuit / P. Valsalal, S. Usa, K. Udayakumar, V. Sankaranarayanan // Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference. – 2002. – V. 2. – № ASIA PACIFIC. – P. 694–698.
7. Карамов Д.Н., Наумов И.В., Пержабинский С.М. Математическое моделирование отказов элементов электрической сети (10 кВ) автономных энергетических систем с возобновляемой распределенной генерацией // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 7. – С. 116–130.
8. Firouzjah K.G. Distribution network expansion based on the optimized protective distance of surge arresters // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2018. – V. 33. – № 4. – P. 1735–1743.
9. Requirements of Arresters for Deeply Suppressing Switching Overvoltage in AC UHV Systems / J. Wu, J. Hu, P. Meng, J. He // Gaodiana Jishu/High Voltage Engineering. – 2017. – V. 43. – № 12. – P. 4132–4138.
10. The power plant arrester configuration and modeling of insulation coordination / P. Chen, X. Fan, H. Wei, J. Zou, X. Xu, Y. He, B. Feng, Z. Wang, H. Liu // Proceedings 2017 Chinese Automation Congress, CAC 2017. – Jinan, China, 2017. – P. 6528–6533.
11. An integrated monitoring system and automatic data analysis to correlate lightning activity and faults on distribution networks / A.E. Lazzaretti, S.L. França Santos, K.K. Küster, L.F. Ribeiro Barrozo Toledo, M.A. Ravaglio, A. Piantini, C.L. da Silva Pinto // Electric Power Systems Research. – 2017. – V. 153. – P. 66–72.
12. Study on lightning overvoltage protection methods for UHV GIS substation with different lightning / L. Wang, J. Xu, S. Hao, H. Chen, S. Ma, W. Zhai // ICEPE-ST 2017 – 4<sup>th</sup> International Conference on Electric Power Equipment- Switching Technology. – Zhangzhou, China, 2017. – P. 808–812.
13. Shariatinasab R., Gholinezhad J. The effect of grounding system modeling on lightning-related studies of transmission lines // Journal of Applied Research and Technology. – 2017. – V. 15. – № 6. – P. 545–554.
14. Букреев В.Г., Шандарова Е.Б., Рулевский В.М. Многомерная модель системы электропитания погружного технологического оборудования // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 119–131.
15. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 1. – С. 123–131.
16. Bedoui S., Bayadi A. Probabilistic evaluation of the substation performance under incoming lightning surges // Electric Power Systems Research. – 2018. – V. 162. – P. 125–133.
17. ГОСТ Р МЭК 62305–1–2010. Менеджмент риска. Защита от молнии. Ч. 1. Общие принципы. – М.: Стандартинформ, 2011. – 45 с.
18. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций (СО 153–34.21.122–2003). – СПб.: ДЕАН, 2005. – 64 с.
19. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 320 с.
20. Кадомская К.П., Рейхердт А.А. Моделирование волны тока молнии при расчетах грозоупорности электрических сетей // Электричество. – 2006. – № 11. – С. 17–23.
21. Сушков В.В., Сухачев И.С., Сидоров С.В. Оценка и способы повышения остаточного ресурса изоляции погружных электродвигателей электротехнического комплекса добычи нефти при воздействиях импульсных перенапряжений // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2017. – № 12. – С. 50–55.
22. Alipio R., Duarte M.H.R., Lima A.C.S. Influence of grounding representation on the lightning performance of line surge arresters. P. I: Impact on the developed overvoltages // SBSE 2018 – 7<sup>th</sup> Brazilian Electrical Systems Symposium. – Rio de Janeiro, Brazil, 2018. – P. 1–6.
23. Влияние внутрискважинного компенсатора на падение напряжения в элементах электротехнического комплекса добывающей скважины / В.А. Копырин, О.В. Смирнов, А.Л. Портнягин, Р.Н. Хамитов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 9. – С. 117–124.

Поступила 05.10.2018 г.

#### Информация об авторах

**Сидоров С.В.**, старший преподаватель кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

**Сушков В.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры энергетики Нижневартковского государственного университета.

**Сухачев И.С.**, старший преподаватель кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

UDC 621.31

## ESTIMATION OF THE EFFECT OF VARIOUS METHODS AND DEVICES OF IMPULSE OVERVOLTAGE PROTECTION IN THE OIL FIELD ELECTRIC NETWORK 6–10 kV

Sergey V. Sidorov<sup>1</sup>,  
sidorovsv@tyuiu.ru

Valery V. Sushkov<sup>2</sup>,  
sushkovvv@gray-nv.ru

Ilya S. Sukhachev<sup>1</sup>,  
sukhachevis@tyuiu.ru

<sup>1</sup> Tyumen Industrial University,  
38, Volodarsky Street, Tyumen, 625000, Russia.

<sup>2</sup> Nizhnevartovsk State University,  
56, Lenin Street, Nizhnevartovsk, 628600, Russia.

**Relevance.** One of the main causes of high accident rate and outages in distributed power supply systems of 6–10 kV oil fields are overvoltages due to lightning effects. The overwhelming number of lightning outages in distribution networks of 6–10 kV, associated with overvoltages, is caused by insufficient level of impulse durability of linear insulation, which leads to the insulator overlap and later to de-energizing of oilfield consumers. To ensure the required lightning resistance of the distributed power supply system for oil fields, various methods are used to install protection devices: non-linear surge arresters, arresters of various types. In this case, the protection devices change the electrical characteristics of the distribution network, which affects the characteristics of transitional processing lightning effects. Therefore, it is necessary to estimate the effect of the most frequently used protective devices on overvoltage in a distributed power supply system for oil fields during lightning effects.

**The main aim** of the research is to estimate the impact of protection devices on overvoltage levels in electric networks of 6 (10) kV of an oil and gas extraction enterprise during lightning effects.

**Methods.** The authors have estimated the influence of protection devices on overvoltage levels by analyzing the transitional process and frequency characteristics for a part of the power supply system on a lightning effect using the algorithms of the Linear Analysis Tools in MATLAB Simulink.

**Results.** The authors determined the dependence of overvoltage level on the type of protective devices and obtained the frequency and time characteristics of the input overvoltage of the consumers, which should be known when choosing protection devices. The dependence of the resonance frequencies on the installed spark gaps is determined. The authors developed in the MATLAB Simulink the simulation model of a typical part of a distributed power supply system of an oil and gas extraction enterprise in Western Siberia, including a non-linear surge arrester, arrester and lightning impulse. The activities to protect oil fields consumers from impulse overvoltages were proposed.

### Key words:

Oil field, overhead power line, non-linear surge arrester, arrester, impulse overvoltage, overvoltage parameters, simulation, frequency analysis, transitional processes.

The research was carried out within the Grant of the President of the RF for state support of young Russian scholars (SP-829.2018.1).

### REFERENCES

1. Sushkov V.V., Timoshkin V.V., Sukhachev I.S., Sidorov S.V. Evaluation of submersible electric motor insulation residual resource in oil production electric centrifugal pumps under the influence of impulse overvoltages. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 10, pp. 74–80. In Rus.
2. Sushkov V.V., Sukhachev I.S. *Ustroystvo registratsii, identifikatsiya perenapryazheniy i otsenki ostatochnogo resursa izolyatsii pogruzhnykh elektrovdigateley* [Registration device, identification of overvoltages and evaluation of the residual life of insulation of submersible motors]. Patent RF, no. 2655948, 2018.
3. Wang H., Zhuang C., Zeng R., Xie S., He J. Transient Voltage Measurements for Overhead Transmission Lines and Substations by Metal-Free and Contactless Integrated Electro-Optic Field Sensors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 66, no. 1, pp. 571–579.
4. Khalilov F.Kh., Goldshteyn V.G., Kolychev A.V., Stepanov V.P., Titkov V.V. *Ogranichiteli perenapryazheniy dlya zashchity izolyatsii elektrooborudovaniya i liniy setey srednego, vysokogo i sverkhvysokogo napryazheniya ot grozovykh i vnutrennikh perenapryazheniy* [Overvoltage limiters for protection of insulation of electrical equipment and medium, high and extra-high voltage network lines from lightning and internal overvoltages]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2010. 264 p.
5. Khalilov F.Kh., Evdokunin G.A., Polyakov V.S. *Zashchita setey 6–35 kV ot perenapryazheniy* [Protection of 6–35 kV networks from overvoltage]. St. Petersburg Energoatomizdat Publ., 2002. 272 p.
6. Valsalal P., Usa S., Udayakumar K., Sankaranarayanan V. Study of importance of line entrance arrester for a composite transmission circuit. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, 2002, vol. 2, no. ASIA PACIFIC, pp. 694–698.

7. Karamov D.N., Naumov I.V., Perzhabinsky S.M. Mathematical modelling of failures of electrical grid (10 kV) of autonomous energy systems with renewable distributed generation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 7, pp. 116–130. In Rus.
8. Firouzjah K.G. Distribution network expansion based on the optimized protective distance of surge arresters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 1735–1743.
9. Wu J., Hu J., Meng P., He J. Requirements of Arresters for Deeply Suppressing Switching Overvoltage in AC UHV Systems. *Gaodianya Jishu/High Voltage Engineering*, 2017, vol. 43, no. 12, pp. 4132–4138.
10. Chen P., Fan X., Wei H., Zou J., Xu X., He Y., Feng B., Wang Z., Liu H. The power plant arrester configuration and modeling of insulation coordination. *Proceedings 2017 Chinese Automation Congress, CAC 2017*, Jinan, China, 2017, pp. 6528–6533.
11. Lazzaretti A.E., França Santos S.L., Küster K.K., Ribeiro Barrozo Toledo L.F., Ravaglio M.A., Piantini A., Da Silva Pinto C.L. An integrated monitoring system and automatic data analysis to correlate lightning activity and faults on distribution networks. *Electric Power Systems Research*, 2017, vol. 153, pp. 66–72.
12. Wang L., Xu J., Hao S., Chen H., Ma S., Zhai W. Study on lightning overvoltage protection methods for UHV GIS substation with different lightning. *ICEPE-ST 2017 – 4<sup>th</sup> International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology*, Zhangzhou, China, 2017, pp. 808–812.
13. Shariatinasab R., Gholinezhad J. The effect of grounding system modeling on lightning-related studies of transmission lines. *Journal of Applied Research and Technology*, 2017, vol. 15, no. 6, pp. 545–554.
14. Bukreev V.G., Shandarova E.B., Rulevskiy V.M. Power supply system model of remote processing equipment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 119–131. In Rus.
15. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Method for identifying parameters of submersible induction motors of electrical submersible pump units for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 1, pp. 123–131. In Rus.
16. Bedoui S., Bayadi A. Probabilistic evaluation of the substation performance under incoming lightning surges. *Electric Power Systems Research*, 2018, vol. 162, pp. 125–133.
17. GOST 62305–1:2010. *Menedzhment riska. Zashchita ot molnii. Ch. 1. Obshchie printsiipy* [State Standard 62305–1:2010. Risk management. Protection against lightning. P. 1. General principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 45 p.
18. CO 153–34.21.122–2003. *Instruktsiya po ustroystvu molniezashchity zdaniy, sooruzheniy i promyshlennyykh kommunikatsiy* [Instructions for lightning protection of buildings, structures and industrial communications]. St. Petersburg, DEAN Publ., 2005. 64 p.
19. Kadomskaya K.P., Lavrov Yu.A., Reykherdt A.A. *Perenapryazheniya v elektricheskikh setyakh razlichnogo naznacheniya i zashchita ot nikh* [Overvoltage in electrical networks for various purposes and protection against them]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2004. 320 p.
20. Kadomskaya K.P., Reykherdt A.A. Simulation of a lightning current wave in calculations of the lightning resistance of electrical networks. *Elektrichestvo*, 2006, no 11, pp. 17–23. In Rus.
21. Sushkov V.V., Sukhachev I.S., Sidorov S.V. Evaluation and methods for increasing the residual insulation resource of submersible electric motors of an electrical engineering complex for oil production under the effects of impulse overvoltages. *Electrical equipment: operation and repair*, 2017, no 12, pp. 50–55. In Rus.
22. Alipio R., Duarte M.H.R., Lima A.C.S. Influence of grounding representation on the lightning performance of line surge arresters. Part I: Impact on the developed overvoltages. *SBSE 2018 – 7<sup>th</sup> Brazilian Electrical Systems Symposium*. Rio de Janeiro, Brazil, 2018, pp. 1–6.
23. Kopyrin V.A., Smirnov O.V., Portnyagin A.L., Khamitov R.N. Influence of downhole compensator on voltage drop in elements of a production well electrical system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 9, pp. 117–124. In Rus.

Received: 5 October 2018.

#### Information about the authors

**Sergey V. Sidorov**, teaching assistant, Tyumen Industrial University.

**Valery V. Sushkov**, Dr. Sc., professor, Nizhnevartovsk State University.

**Ilya S. Sukhachev**, teaching assistant, Tyumen Industrial University.

УДК 681.5

## ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КАТАЛИТИЧЕСКОГО РИФОРМИНГА И МЕТОД ЕЕ РЕШЕНИЯ

Матвейкин Валерий Григорьевич<sup>1</sup>,  
ipu@ahp.tstu.ru

Дмитриевский Борис Сергеевич<sup>1</sup>,  
dmiboris@yandex.ru

Кокуев Андрей Геннадьевич<sup>2</sup>,  
kokuevag@gmail.com

Джамбеков Азамат Матифулаевич<sup>2</sup>,  
azamat-121@mail.ru

<sup>1</sup> Тамбовский государственный технический университет,  
Россия, 392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106.

<sup>2</sup> Астраханский государственный технический университет,  
Россия, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью обеспечения оптимальных соотношений октанового числа бензина и издержек организации процесса на установке каталитического риформинга мощностью 1 млн т/год по сырью в условиях переменного качества сырья и качества топливного газа. Эффективность производства бензина зависит не только от повышения октанового числа, но и от снижения издержек организации процесса. Существующие системы управления процессом каталитического риформинга не обеспечивают достижения оптимальных соотношений октанового числа бензина и издержек организации процесса. Необходима разработка системы управления процессом каталитического риформинга, обеспечивающей достижение данных соотношений.

**Цель:** достижение оптимальных соотношений октанового числа бензина и издержек организации процесса на установке каталитического риформинга мощностью 1 млн т/год по сырью в условиях переменного качества сырья и качества топливного газа путем разработки системы управления.

**Объект:** установка каталитического риформинга мощностью 1 млн т/год по сырью.

**Методы** исследования основаны на использовании теории нечетких множеств, теории принятия решений в нечетких условиях, вычислительной математики, теории автоматического управления.

**Результаты.** Поставлена задача управления процессом каталитического риформинга на установке риформинга Л-35–11/1000 мощностью 1 млн т/год по сырью. Проведен анализ процесса как объекта управления с выделением его особенностей. Описан набор входных и выходных параметров объекта управления. Представлено выражение для определения обобщенного критерия оптимальности. Разработана система управления процессом каталитического риформинга. Реализация предлагаемой системы обеспечивает достижение оптимальных соотношений октанового числа бензина и производственных затрат.

### Ключевые слова:

Каталитический риформинг, обобщенный критерий оптимальности, нечеткая цель, нечеткое ограничение, нечеткое решение.

### Введение

В настоящее время актуальным является направление повышения эффективности технологических процессов на основе разработки автоматизированных систем управления [1, 2]. Большое значение для экономического развития России имеют технологические процессы и производства нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Одним из важнейших процессов нефтепереработки и нефтехимии является каталитический риформинг (КР), основное назначение которого состоит в получении высокооктанового бензинового топлива [3]. Существенный вклад в разработку и совершенствование подходов к моделированию и управлению процессом КР внесли такие ученые, как В.В. Кафаров [4], И.Н. Дорохов [4], Г.М. Панченков [5], Н.Ф. Рубекин [6], Ю.М. Жоров [7], А.В. Кравцов [8], Э.Д. Иванчина [8], А.Г. Шумихин [9] и др.

Существующие системы управления процессом КР реализуют: оптимальное распределение температур на входах в реакторы [10], оптимизацию технологического режима процесса [11], управление качеством стабильного катализата [12], ситуационное управление процессом [13] и пр. При этом отсутствуют системы управления процессом КР, направленные на снижение издержек организации процесса и повышение октанового числа бензина.

Поскольку эффективность производства бензина зависит не только от повышения октанового числа выпускаемого топлива, но и от снижения издержек организации процесса, является актуальной задача, связанная с разработкой системы управления процессом КР, обеспечивающей достижение оптимальных соотношений октанового числа бензина и издержек организации процесса. Для исследования процесса КР необходимо провести его анализ как объекта управления.

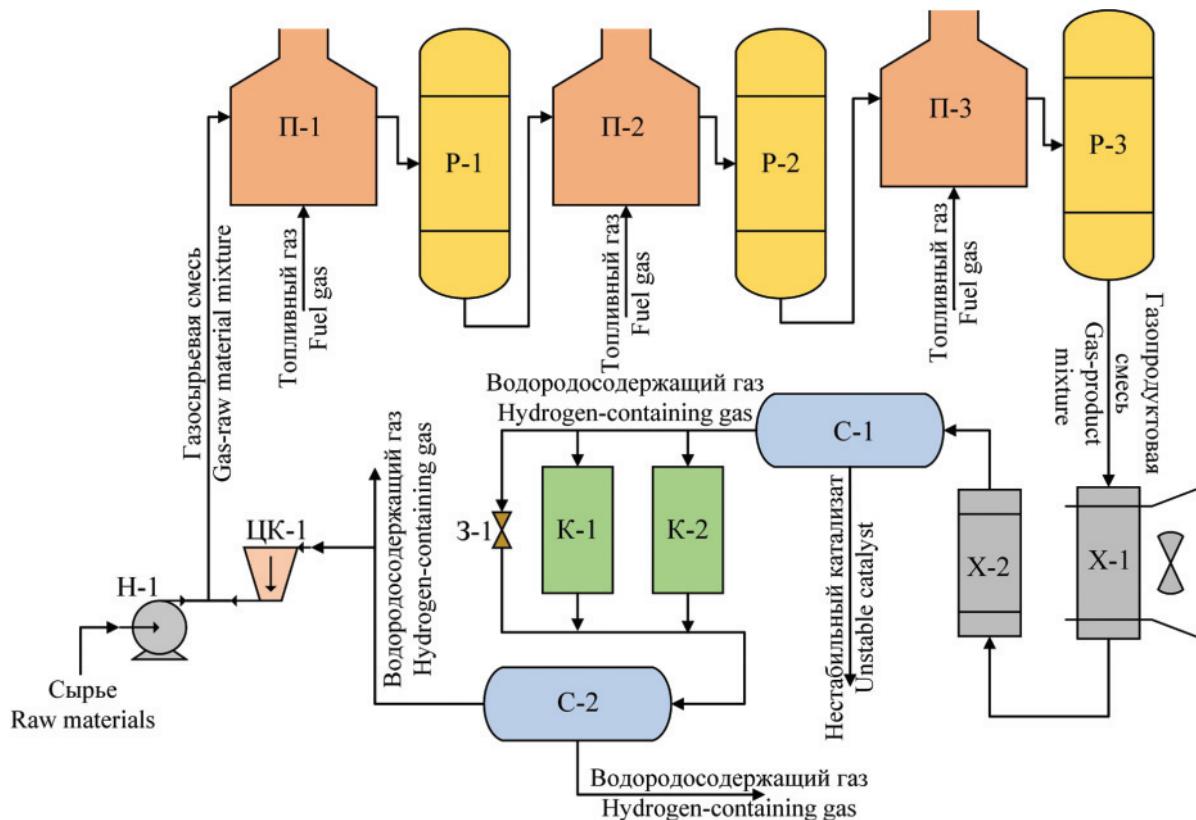


Рис. 1. Упрощенная технологическая схема процесса каталитического риформинга

Fig. 1. Catalytic reforming simplified flow chart

### Постановка задачи управления

Основными аппаратами процесса КР являются реакторы P-1, P-2, P-3 и печи П-1, П-2, П-3, к вспомогательным аппаратам относятся: аппарат воздушного охлаждения X-1, водяной холодильник X-2, сепараторы C-1, C-2, адсорберы-осушители K-1, K-2, центробежный компрессор ЦК-1, насос H-1 (рис. 1) [14].

Процесс КР как объект управления характеризуется набором входных и выходных параметров (рис. 2). Все параметры были разделены на четыре группы и представлены в векторной форме:

1. Вектор управляющих воздействий  $U$ : расход топливного газа  $Q_{fg}$ ; расход сырья  $Q_r$ .
2. Вектор возмущающих воздействий  $V$ : качество сырья  $QR$ ; качество топливного газа  $QFG$ .
3. Вектор режимных параметров процесса  $A$ : температура на входе  $T_{in}$  и выходе  $T_{out}$  печи; давление в реакторе  $P$ ; перепад температуры в реакторе  $\Delta T$ ; расход водородосодержащего газа  $Q_{hg}$ ; активность катализатора  $AC$ ; состояние печи  $CF$ .
4. Вектор выходных параметров  $W$ : октановое число бензина  $ON$ ; издержки организации процесса  $Z$  [15].

Особенностью объекта является наличие качественной информации, входящей в состав векторов режимных параметров процесса  $A$  и возмуща-

ющих воздействий  $F$ : активность катализатора  $AC$  (низкая  $N$ , ниже средней  $ZN$ , средняя  $Z$ , выше средней  $ZP$ , высокая  $P$ ); качество сырья  $QR$  (низкое  $N$ , ниже среднего  $ZN$ , среднее  $Z$ , выше среднего  $ZP$ , высокое  $P$ ); качество топливного газа  $QFG$  (низкое  $N$ , ниже среднего  $ZN$ , среднее  $Z$ , выше среднего  $ZP$ , высокое  $P$ ); состояние печи  $CF$  (низкое  $N$ , ниже среднего  $ZN$ , среднее  $Z$ , выше среднего  $ZP$ , высокое  $P$ ). В работе [16] обоснована целесообразность учета данных параметров в математической модели (ММ) процесса КР как лингвистических переменных (ЛП), с использованием которых предложено учитывать накопленный опыт операторов-технологов. Данные переменные не могут быть измерены обычными способами и вводятся оператором. Предложенная модель применяется в системе управления при поиске экстремума целевой функции. Формализация качественной информации производится на основе методов экспертного опроса. На основе данного подхода определены функции принадлежности (ФП) для каждой ЛП процесса КР. Функции принадлежности могут уточняться с изменением экспертного мнения.

Цель управления – достижение минимального значения обобщенного критерия оптимальности (ОКО) (1) в условиях переменного качества сырья и качества топливного газа.

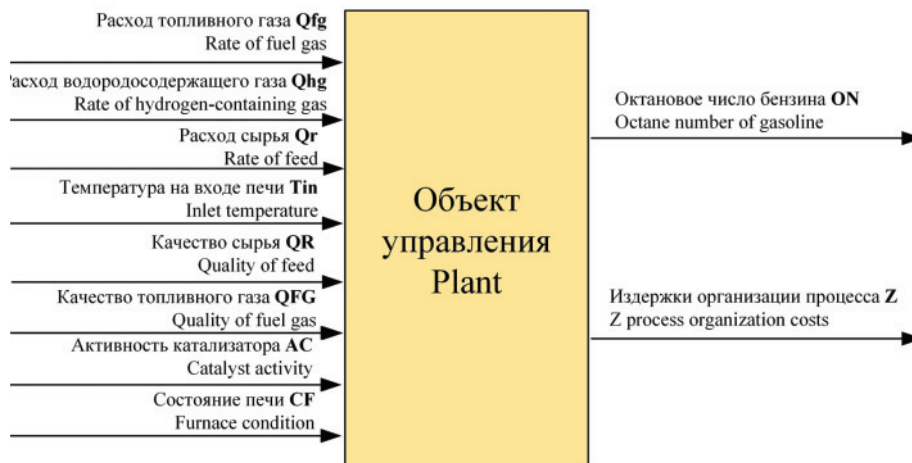


Рис. 2. Наборы входных и выходных параметров процесса как объекта управления

Fig. 2. Sets of input and output parameters of the process as a control object

$$J = k_1 ON_0 \frac{1}{ON} + \frac{k_2}{Z_0} Z = k_1 J_1 + k_2 J_2, \quad (1)$$

где  $J$  – ОКО;  $ON_0$  – минимальное значение октанового числа бензина;  $Z_0$  – максимальные издержки организации процесса;  $J_1$  – нормированный критерий минимума величины, обратной октановому числу бензина  $ON$ ;  $J_2$  – нормированный критерий минимума издержек организации процесса  $Z$ ;  $k_1, k_2$  – весовые коэффициенты, регулирующие относительную важность критериев  $J_1, J_2$  в отношении принятия решений,  $k_1 + k_2 = 1, 0 < k_1 < 1, 0 < k_2 < 1$ .

Выбор критерия (1) обусловлен необходимостью объединения частных критериев и приведения их к безразмерной величине.

Задача управления процессом КР мощностью 1 млн т/год по сырью (2) формулируется следующим образом: найти оптимальные решения по управлению процессом КР, при которых достигается минимум ОКО с учетом воздействия возмущений  $V$  и заданных ограничений на выходные параметры  $W$ :

$$\begin{aligned} F \left( \begin{matrix} Q_{fg}, Q_{hg}, Q_r, T_{in}, \\ QR, QFG, AC, CF \end{matrix} \right) &= \min_{\{Q_r, Q_{fg}\} \in U} J, \\ \{Q_r, Q_{fg}\} &\in U; \\ \{Q_{hg}, T_{in}, T_{out}, \Delta T, P, AC, CF\} &\in A; \\ \{QR, QFG\} &\in V; \\ \{ON, Z\} &\in W; \end{aligned} \quad (2)$$

при ограничениях (3):

$$\begin{aligned} ON &\geq 92; \\ Z &\leq 7,6 (\text{млн руб.}); \\ U_i &\leq U_i \leq \bar{U}_i, i = \overline{1, n}; \\ A_j &\leq A_j \leq \bar{A}_j, j = \overline{1, m}; \\ V_l &\leq V_l \leq \bar{V}_l, l = \overline{1, p}; \\ W_k &\leq W_k \leq \bar{W}_k, k = \overline{1, q}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\{Q_r, Q_{fg}\}$  – решения по управлению;  $U$  – вектор управлений;  $A$  – вектор режимных параметров объекта;  $V$  – вектор возмущений;  $W$  – вектор выходных параметров.

Анализ современных задач управления процессом КР показал, что отсутствует общий подход к решению задачи, решения существуют только по отдельным направлениям и применяемые в них методы управления не являются достаточно эффективными в условиях воздействия возмущений (качества сырья, качества топливного газа) [17].

На основании выявленных недостатков сделан вывод о том, что главная причина сложившейся ситуации в современной теории и практике управления процессом КР заключается в отсутствии системного анализа связей между выходными величинами и возмущающими воздействиями.

Результаты анализа показали, что усовершенствование управления процессом КР должно заключаться в использовании системой управления:

- расчетных и экспериментальных значений выходных параметров;
- качественной информации о возмущениях;
- управляющих воздействий, определенных по ММ процесса;
- нечетких целей и ограничений для учета экспертной информации при определении оптимальных решений по управлению процессом.

Сущность предлагаемого решения заключается в компенсации системой управления возмущений за счет учета экспертной информации об объекте и достижения оптимальных соотношений октанового числа бензина и издержек организации процесса.

Для достижения цели управления предлагается концепция управления процессом КР, состоящая в том, что оптимизация процесса производится с учетом экспертной информации о действующих возмущениях, причем начальной точкой поиска являются оптимальные значения, найденные без учета возмущений.

Алгоритм поиска начальной точки оптимизации процесса КР представим в виде последовательности решений по управлению процессом КР  $U$ , при которых достигается минимум ОКО без учета воздействия возмущений  $V$ .

Для решения задачи условной оптимизации (2), относящейся к классу задач нелинейного программирования, предложено использование метода штрафных функций. При этом исходная задача условной оптимизации сводится к задаче безусловной оптимизации [18].

Среди существующих типов штрафов выбран штраф типа «бесконечный барьер», отличающийся простотой своего вычисления. Приведем описание функции штрафа для управляющих воздействий (4):

$$\Omega(Q_r) = \begin{cases} 0, & \text{если } Q_r \geq 190; \\ 10^5, & \text{если } Q_r \leq 130; \end{cases}$$

$$\Omega(Q_{fg}) = \begin{cases} 0, & \text{если } Q_{fg} \geq 1150; \\ 10^5, & \text{если } Q_{fg} \leq 750. \end{cases} \quad (4)$$

Для поиска экстремума целевой функции  $J(x, y)$ , где  $x$  – расход сырья,  $y$  – расход топливного газа, рассматривались методы прямого поиска, не требующие вычисления производных, поскольку целевая функция в настоящей работе не является дифференцируемой. При этом выбран метод конфигураций, достоинствами которого перед другими методами безусловной оптимизации (Монте-Карло, Нелдера–Мида, Розенброка, сопряженных направлений, поиска по симплексу и т. д.) являются простота стратегии поиска и небольшой объем требуемой памяти [19].

На основе метода конфигураций и метода штрафных функций был разработан алгоритм поиска начальной точки оптимизации процесса КР. С использованием данного алгоритма были получены результаты поиска решений по управлению процессом КР  $U$ : расход сырья  $x_0 = 160$  (м<sup>3</sup>/ч) и расход топливного газа  $y_0 = 950$  (м<sup>3</sup>/ч).

Алгоритмом оптимизации процесса КР с учетом экспертной информации является процедура поиска оптимальных решений по управлению процессом КР  $U^*$ , при которых достигается минимум ОКО с учетом воздействия возмущений  $V$ .

Для учета воздействия возмущений при поиске оптимальных решений по управлению процессом КР предложено использование схемы Беллмана–Заде. Данный подход позволяет определять оптимальные решения  $U^*$ , используя результаты поиска решений по управлению процессом  $U$  на основе задания нечетких целей и ограничений и определения нечеткого решения. Иллюстрация данного подхода применительно к поиску оптимального расхода сырья приведена на рис. 3 [20].

На рис. 3 показано пересечение функций принадлежности (ФП) нечетких множеств, соответствующих нечеткой цели и двум нечетким ограничениям.

Нечеткая цель  $G$  задана в виде высказывания «значение ОКО должно быть минимально», отражает главную цель управления процессом КР и представлена в виде гауссовой ФП с точкой максимума, соответствующей решению по управлению процессом  $U = \{x_0, y_0\}$ , при котором достигается минимум ОКО без учета воздействия возмущений  $V$ .

Первое нечеткое ограничение  $C_1$  задано в виде высказывания «активность катализатора должна быть выше средней», отражает необходимое требование к режиму процесса КР и представлено в виде сигмоидной ФП, точка перегиба которой соответствует решению по управлению процессом  $U_1 = \{x_1, y_1\}$ , рекомендованному лицом, принимающим решение (ЛПР), для компенсации возмущения: изменения качества сырья  $QR$ .

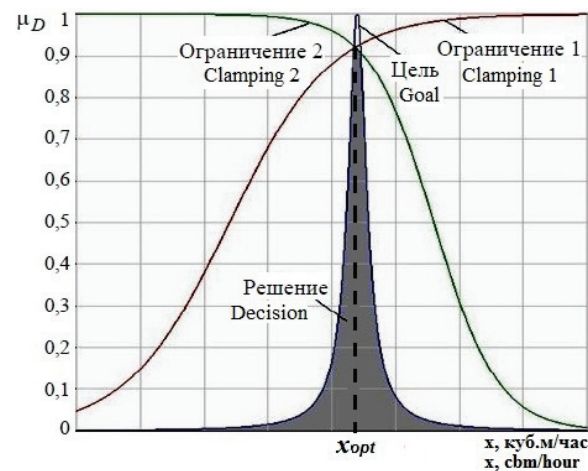


Рис. 3. Поиск оптимального расхода сырья по схеме Беллмана–Заде

Fig. 3. Search for the optimal consumption of raw materials according to the Bellman–Zade scheme

Второе нечеткое ограничение  $C_2$  задано в виде высказывания «состояние печи риформинга должно быть лучше среднего», отражает необходимое требование к режиму процесса КР и представлено в виде сигмоидной ФП, точка перегиба которой соответствует решению по управлению процессом  $U_2 = \{x_2, y_2\}$ , рекомендованному ЛПР для компенсации возмущения: изменения качества топливного газа  $QFG$ .

На основе конфликта цели и ограничений получаем область значений ФП  $\mu_D(x, y)$  «Решение», соответствующую множеству оптимальных решений по управлению процессом КР. Из данной области определяем координаты  $(x_{opt}, y_{opt})$ , соответствующие максимуму ФП нечеткого решения (5).

$$\mu_D(x_{opt}, y_{opt}) = \max \mu_D(x, y) = \max \min(\mu_G(x, y), \mu_{C_1}(x, y), \mu_{C_2}(x, y)). \quad (5)$$

где  $\mu_D(x, y)$  – гауссова ФП, соответствующая нечеткой цели;  $\mu_{C_1}(x, y)$  – сигмоидная ФП, соответствующая первому нечеткому ограничению;  $\mu_{C_2}(x, y)$  – сигмоидная ФП, соответствующая второму нечеткому ограничению.

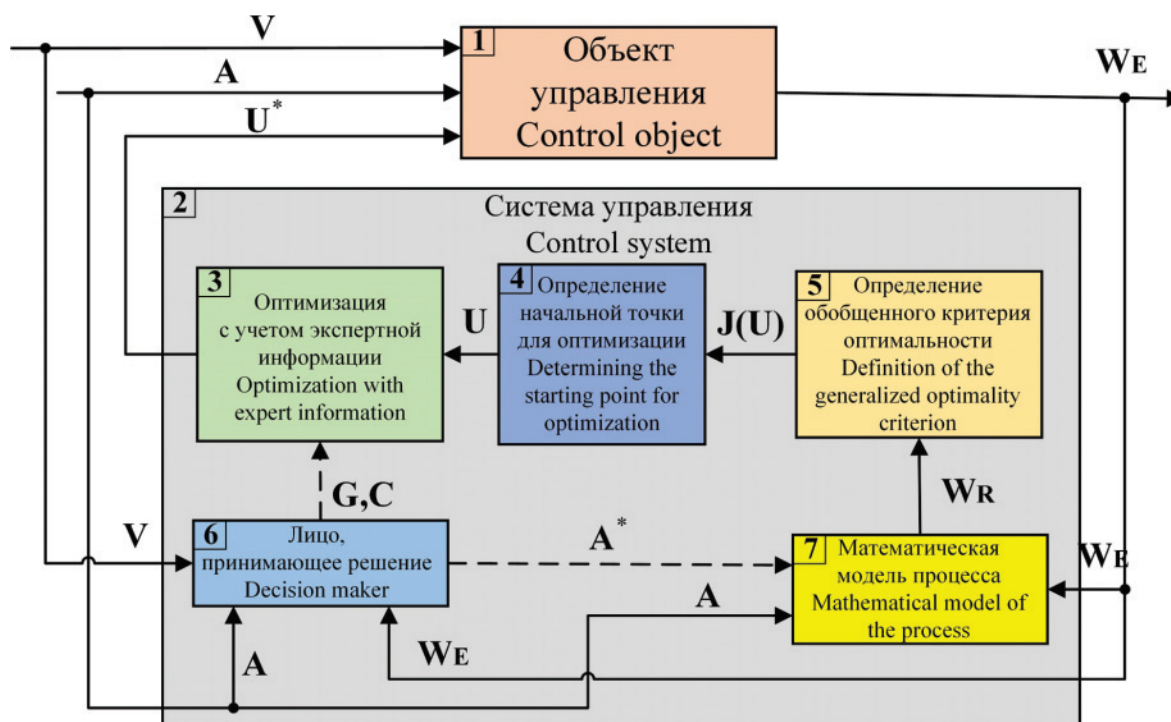


Рис. 4. Структура системы управления процессом каталитического риформинга

Fig. 4. Structure of the catalytic reforming process control system

На основе схемы Беллмана–Заде был разработан алгоритм оптимизации процесса КР с учетом экспертной информации. С использованием данного алгоритма были получены результаты поиска оптимальных решений по управлению процессом КР  $U^*$ : расход сырья  $x_{opt}=162$  (м<sup>3</sup>/ч) и расход топливного газа  $y_{opt}=970$  (м<sup>3</sup>/ч).

#### Реализация и полученные результаты

Для решения поставленной задачи разработано программное обеспечение на языке Visual C#. На рис. 4 представлена структура системы управления процессом КР.

Система управления процессом КР – 2 включает ряд блоков: блок определения ОКО по ММ процесса – 5, блок определения начальной точки для оптимизации – 4, блок оптимизации с учетом экспертной информации – 3.

На вход ММ процесса КР – 7 поступают значения вектора режимных параметров  $A$  в виде данных контрольно-измерительных приборов, экспериментальные значения вектора выходных переменных  $W_E$  в виде результатов анализов из химико-аналитической лаборатории, а также ЛПР – 6 задает значения качественных режимных параметров  $A^*$  (активность катализатора, состояние печи риформинга).

На вход блока – 5 поступают расчетные значения вектора выходных переменных  $W_R$ , полученные на выходе ММ процесса КР – 7.

На основе блока – 4 определяются решения по управлению  $U$ , соответствующие минимуму ОКО  $J$

( $U$ ) без учета воздействия возмущений  $V$ . Полученные решения по управлению необходимы для задания нечеткой цели в блоке – 3.

В блоке – 3 определяются оптимальные решения по управлению  $U^*$ , соответствующие минимуму ОКО  $J(U)$  с учетом воздействия возмущений  $V$ , которые в качестве управляющих воздействий поступают на объект управления – 1.

Выходные параметры процесса КР, октановое число бензина и издержки организации процесса находятся в состоянии антагонизма, т. е. улучшение одного из них приводит к ухудшению другого.

Результаты сравнения АСУ процесса КР по среднесуточным издержкам организации процесса показали, что при управлении процессом на основе разработанной системы, примененной в течение месяца работы установки Л-35–11/1000, обеспечивается снижение среднесуточных издержек организации процесса на 0,24 млн р. по сравнению с управлением процессом по проектному решению, примененному за аналогичный период времени. С учетом допущения, что одинаков характер протекания процесса КР на установке Л-35–11/1000 в течение года, определено снижение среднегодовых издержек организации процесса при управлении процессом на основе разработанной системы, равное 86,74 млн р. При сравнении АСУ процесса КР по среднему октановому числу были вычислены средние значения данного параметра: 92,37 – при управлении процессом по проектному решению, примененному в течение месяца работы установки Л-35–11/1000; 93,47 – за аналогичный период вре-



Рис. 5. Изменение обобщенного критерия оптимальности

Fig. 5. Modification of the generalized optimality criterion

мени, но при управлении на основе разработанной системы. Исходя из этого было установлено, что при управлении процессом на основе разработанной системы, примененной в течение месяца работы установки Л-35–11/1000, обеспечивается повышение среднего октанового числа бензина на 1,1 по сравнению с управлением процессом по проектно-му решению, примененному за аналогичный период времени. Разработанная система управления обеспечивает уменьшение среднегодовых издержек организации процесса на 86,74 млн р. при отсутствии увеличения октанового числа, а также обеспечивает повышение среднего октанового числа бензина на 1,1 при отсутствии уменьшения издержек организации процесса.

На рис. 5 приведен пример ожидаемого снижения ОКО: 1 – при управлении процессом по проектно-

мому решению, примененному в течение месяца работы установки Л-35–11/1000, 2 – за аналогичный период времени, но при управлении на основе разработанной системы. Среднее значение ОКО уменьшилось на 2,2 %.

#### Заключение

Таким образом, проведен анализ существующих подходов к управлению процессом каталитического риформинга; разработана система управления процессом каталитического риформинга, включающая алгоритм поиска начальной точки оптимизации процесса и алгоритм оптимизации процесса с учетом экспертной информации; поставлена и решена задача управления процессом каталитического риформинга по обобщенному критерию оптимальности при ограничениях на выходные параметры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программно-алгоритмический комплекс защиты и управления предприятием / В.С. Дмитриевский, В.Г. Матвейкин, В.И. Медников, С.Г. Семержинский // Программные продукты и системы. – 2017. – № 2. – С. 307–313.
2. Управление инновационным развитием наукоемкой производственной системы / В.Г. Матвейкин, В.С. Дмитриевский, О.В. Дмитриева, В.Р. Разиева, М.В. Сивова // Вопросы современной науки и практики. – 2016. – № 3 (61). – С. 146–152.
3. Catalytic Cracking (FCC) Process Modeling, Simulation, and Control / C.I.C. Pinheiro, J.L. Fernandes, L. Domingues et al. // Industrial Engineering Chemistry Research. – 2012. – № 51 (1). – Р. 1–29.
4. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии. – М.: Наука, 1976. – 500 с.
5. Панченков Г.М. Каталитические и радиационно-химические процессы нефтепереработки и нефтехимии. – М.: Химия, 1982. – 152 с.
6. Рубекин Н.Ф. Системы автоматического оптимального управления каталитическими процессами платформинга и гидроочистки. – М.: ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ, 1972. – 66 с.
7. Жоров Ю.М. Расчеты и исследования каталитических процессов нефтепереработки. – М.: Химия, 1973. – 216 с.
8. Математическое моделирование каталитических процессов переработки углеводородного сырья / А.В. Кравцов, Э.Д. Иванчина, Е.Н. Ивашкина, А.В. Костенко, Е.М. Юрьев, В.С. Бесков // Катализ в промышленности. – 2008. – № 6. – С. 41–46.
9. Применение многоуровневой математической модели процесса каталитического риформинга бензиновых фракций в системе управления промышленными установками / В.Г. Плехов,

- С.Н. Кондрашов, А.Г. Шумихин // Автоматизация в промышленности. – 2009. – № 7. – С. 37–42.
10. Coleman B., Babu J. Techniques of Model-Based Control. – Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2002. – 576 p.
11. Bequette W. Process Control Modeling Design and Simulation. – Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2003. – 564 p.
12. Gumen M.I. et al. Increasing of the Efficiency of the Reforming LG-35-11/300 // Petroleum Processing and Petrochemistry. – 2001. – № 11. – P. 54–57.
13. Mircea C., Agachi S., Marimoiu V. Simulation and Model Predictive Control of a UOP Fluid Catalytic Cracking // Chemical Engineering and Processing. – 2003. – V. 42. – P. 67.
14. Ancheyta J. Modeling and simulation of catalytic reactors for petroleum refining. – Hoboken: Wiley, 2011. – 528 p.
15. Weekman V.A. Model of Catalytic Cracking Conversion in Fixed, Moving and Fluid-Bed Reactors // Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development. – 1968. – № 7 (1). – P. 90–95.
16. Проталинский О.М. Применение методов искусственного интеллекта при автоматизации технологических процессов: монография. – Астрахань: Изд-во Астрах. гос. техн. ун-та, 2004. – 183 с.
17. Smith J.M. Chemical engineering kinetics. – St. Louis: McGraw-Hill, 1981. – 676 p.
18. Литовка Ю.В., Као В.З. Моделирование и оптимизация гальванической ванны с дополнительными катодами // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2016. – Т. 22. – № 1. – С. 68–74.
19. Литовка Ю.В., Као В.З., Соловьёв Д.С. Оптимизация гальванической ванны с дополнительными катодами и биполярными электродами // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2016. – № 2. – С. 7–17.
20. Джамбеков А.М. Использование информационных технологий для обеспечения автоматизированного управления процессом каталитического риформинга в условиях неопределенности // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2017. – № 2 (38). – С. 36–46.

Поступила 12.11.2018 г.

#### Информация об авторах

**Матвейкин В.Г.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационных процессов и управления Института автоматики и информационных технологий Тамбовского государственного технического университета.

**Дмитриевский Б.С.**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры информационных процессов и управления Института автоматики и информационных технологий Тамбовского государственного технического университета.

**Кокуев А.Г.**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматики и управления Института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета.

**Джамбеков А.М.**, аспирант кафедры автоматики и управления Института информационных технологий и коммуникаций Астраханского государственного технического университета.

UDC 681.5

## PROBLEM OF CONTROL OF CATALYTIC REFORMING AND METHOD OF ITS SOLUTIONS

Valery G. Matveykin<sup>1</sup>,  
ipu@ahp.tstu.ru

Boris S. Dmitrievsky<sup>1</sup>,  
dmiboris@yandex.ru

Andrey G. Kokuev<sup>2</sup>,  
kokuevag@gmail.com

Azamat M. Dzhambekov<sup>2</sup>,  
azamat-121@mail.ru

<sup>1</sup> Tambov State Technical University,  
106, Sovetskaya Street, Tambov, 392000, Russia.

<sup>2</sup> Astrakhan State Technical University,  
16, Tatishchev Street, Astrakhan, 414056, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to ensure optimal ratios of the octane number of gasoline and the cost of organizing the process in a catalytic reformer with a capacity of 1 million tons per year for raw materials in conditions of variable quality of raw materials and quality of fuel gas. The effectiveness of gasoline production depends not only on increasing the octane number, but also on reducing the costs of the process organization. The existing systems for controlling the catalytic reforming do not ensure the achievement of optimal ratios of the octane number of gasoline and the costs of the process organization. It is necessary to develop a control system for the catalytic reforming process, which ensures the achievement of these ratios.

**The main aim** of the research is to achieve optimum octane number ratio of gasoline and process organization costs in a catalytic reformer with a capacity of 1 million tons per year for raw materials in conditions of varying quality of raw materials and quality of fuel gas by developing a management system.

**Object** of the research is the catalytic reforming unit with a capacity of 1 million tons per year for raw materials.

**Methods:** fuzzy sets theory, decision theory in fuzzy conditions, computational mathematics, automatic control theory.

**Results.** The authors have set the task of controlling the process of catalytic reforming at a L-35-11 / 1000 reformer with a capacity of 1 million tons per year for raw materials and carried out the analysis of the process as a control object with the identification of its features. The paper describes the set of input and output parameters of the control object and introduces the expression for determining the generalized optimality criterion. The authors developed the system for controlling the catalytic reforming. The implementation of the proposed system ensures the achievement of optimal ratios of the octane number of gasoline and production costs.

**Key words:**

Catalytic reforming, generalized optimality criterion, fuzzy goal, unclear constraint, fuzzy solution.

## REFERENCES

1. Dmitrievsky B.S., Matveykin V.G., Mednikov V.I., Semerzhinsky S.G. Program-algorithmic complex of protection and enterprise management. *Software products and systems*, 2017, no. 1, pp. 307–313. In Rus.
2. Matveykin V.G., Dmitrievsky B.S., Dmitrieva O.V., Rzieva V.R., Sivova M.V. Management of innovative development of a knowledge-based production system. *Issues of modern science and practice*, 2016, no. 3 (61), pp. 146–152. In Rus.
3. Pinheiro C.I.C., Fernandes J.L., Domingues L. Catalytic Cracking (FCC) Process Modeling, Simulation, and Control. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2012, no. 51 (1), pp. 1–29.
4. Kafarov V.V., Dorokhov I.N. *Sistemny analiz protsessov khimicheskoy tekhnologii. Osnovy strategii* [System analysis of the processes of chemical technology. Fundamentals of strategy]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 500 p.
5. Panchenkov G.M. *Kataliticheskie i radiatsionno-khimicheskie protsessy neftepererabotki i neftekhimii* [Catalytic and radiation-chemical processes of oil refining and petrochemistry]. Moscow, Khimiya Publ., 1982. 152 p.
6. Rubekin N.F. *Sistemy avtomaticheskogo optimalnogo upravleniya kataliticheskimi protsessami platforminga i gidroochistki* [Systems of automatic optimal control of catalytic processes of platforming and hydrotreatment]. Moscow, TsNIITNEFTEHIM Publ., 1972. 66 p.
7. Zhorov Yu.M. *Raschety i issledovaniya kataliticheskikh protsessov neftepererabotki* [Calculations and studies of catalytic processes of oil refining]. Moscow, Khimiya Publ., 1973. 216 p.
8. Kravtsov A.V., Ivanchina E.D., Ivashkina E.N., Kostenko A.V., Yuryev E.M., Beskov V.S. Mathematical modeling of catalytic processes of hydrocarbon feedstock processing. *Catalysis in the industry*, 2008, no. 6, pp. 41–46. In Rus.
9. Plekhov V.G., Kondrashov S.N., Shumikhin A.G. Application of a multilevel mathematical model of the process of catalytic reforming of gasoline fractions in the industrial plant control system. *Automation in the industry*, 2009, no. 7, pp. 37–42. In Rus.
10. Coleman B., Babu J. *Techniques of Model-Based Control*. Upper Saddle River, Prentice Hall PTR Publ., 2002. 576 p.
11. Bequette W. *Process Control Modeling Design and Simulation*. Upper Saddle River, Prentice Hall PTR Publ., 2003. 564 p.
12. Gumen M.I. Increasing of the Efficiency of the Reforming LG-35-11/300. *Petroleum Processing and Petrochemistry*, 2001, no. 11, pp. 54–57.
13. Mircea C., Agachi S., Marimoiu V. Simulation and Model Predictive Control of a UOP Fluid Catalytic Cracking. *Chemical Engineering and Processing*, 2003, vol. 42, p. 67.

14. Ancheyta J. *Modeling and simulation of catalytic reactors for petroleum refining*. Hoboken, Wiley Publ., 2011. 528 p.
15. Weekman V.A. Model of Catalytic Cracking Conversion in Fixed, Moving and Fluid-Bed Reactors. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1968, no. 7 (1), pp. 90–95.
16. Protalinsky O.M. *Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta pri avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov: monografiya* [Application of artificial intelligence methods in automation of technological processes: monograph]. Astrakhan, Astrakhan State Technical University Publ. house, 2004. 183 p.
17. Smith J.M. *Chemical engineering kinetics*. St. Louis, McGrawHill Publ., 1981. 676 p.
18. Litovka Yu.V., Kao V.Z. Modeling and optimization of a galvanic bath with additional cathodes. *Bulletin of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 1, pp. 68–74. In Rus.
19. Litovka Yu.V., Kao V.Z., Solovyov D.S. Optimization of galvanic bath with additional cathodes and bipolar electrodes. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2016, no. 2, pp. 7–17. In Rus.
20. Dzhambekov A.M. Use of information technologies to provide automated control over the process of catalytic reforming in conditions of uncertainty. *Prikaspiysky Journal: Management and High Technologies*, 2017, no. 2 (38), pp. 36–46. In Rus.

*Received: 12 November 2018.*

#### **Information about the authors**

**Valery G. Matveykin**, Dr. Sc., professor, Tambov State Technical University.

**Boris S. Dmitrievsky**, Dr. Sc., associate professor, Tambov State Technical University.

**Andrey G. Kokuev**, Cand. Sc., associate professor, Astrakhan State Technical University.

**Azamat M. Dzhambekov**, graduate student, Astrakhan State Technical University.

УДК 622.276

## РАЗРАБОТКА ДИЗАЙНА ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ КАРБОНАТНОГО КОЛЛЕКТОРА

Давыдова Анастасия Евгеньевна<sup>1,2</sup>,  
DavydovaAE@knipi.rosneft.ru

Щуренко Александр Александрович<sup>1,2</sup>,  
ShchurenkoAA@knipi.rosneft.ru

Дадакин Никита Михайлович<sup>1,2</sup>,  
DadakinNM@knipi.rosneft.ru

Шуталев Артем Дмитриевич<sup>1,2</sup>,  
ShutalevAD@knipi.rosneft.ru

Квеско Бронислав Брониславович<sup>1</sup>,  
kveskobb@gmail.com

<sup>1</sup> Институт нефти и газа Сибирского Федерального университета,  
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

<sup>2</sup> ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть»,  
Россия, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, 24в.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью совершенствования методов гидродинамических исследований скважин вследствие неоднозначности интерпретации результатов в условиях карбонатного коллектора. Приоритетами при проведении гидродинамических исследований скважин являются максимальное качество получаемой информации о фильтрационно-емкостных свойствах пластов и минимальные потери добычи нефти в ходе остановки скважин на исследования. С целью выполнения данных задач актуальной является разработка дизайна гидродинамических исследований скважин, предлагаемая в статье. Дизайн позволит обеспечить комплексный подход к моделированию процесса проведения исследований и прогноза получаемых данных.

**Цель:** разработать дизайн гидродинамических исследований скважин с целью оптимизации времени проведения исследований и сокращения периода остановки скважин на этапе опытно-промышленной эксплуатации; подтвердить экономическую эффективность представленной методики.

**Объекты:** скважины Т-23, Т-361, Т-388 месторождения А, продуктивные отложения которого преимущественно представлены кавернозно-трещиноватыми карбонатными породами рифейского возраста.

**Методы.** Поставленные задачи исследования решались теоретически и экспериментально в промысловых условиях. При этом был выполнен анализ публикаций по данной проблеме; проведены промысловые гидродинамические исследования скважин, вскрывающих низкопроницаемый карбонатный коллектор; выполнено моделирование гидродинамических исследований, выполнены сравнительные расчёты по обработке результатов с помощью программного комплекса Saphir компании «KAPPA Engineering».

**Результаты.** Приведены результаты разработки дизайна гидродинамических исследований в условиях карбонатного коллектора. Проанализированы данные гидродинамических исследований для 12 скважин, эксплуатирующих рифейские карбонатные отложения, за период с 2005–2008 гг. представлены результаты по трем скважинам: Т-23, Т-361, Т-388. Представлена методика моделирования гидродинамических исследований в программном комплексе Saphir компании «KAPPA Engineering». Приведен пример расчета времени стабилизации при исследовании скважины методом установившихся отборов, а также оценка оптимального времени регистрации кривой восстановления давления. Также приведено сравнение стандартной методики, которой руководствуются при испытании скважины – РД (руководящий документ) 153–39.0–109–01 «Методические указания по комплексированию и этапность выполнения геофизических, гидродинамических и геохимических исследований нефтяных и нефтегазовых месторождений», с методикой, представленной в статье. На основе данного сравнения была установлена экономическая эффективность.

### Ключевые слова:

Гидродинамические исследования скважин, кривая восстановления давления, дизайн, длительность исследования скважины, карбонатный коллектор, нефтегазовое месторождение.

### Введение

В мировом балансе энергоносителей доля углеводородов, сосредоточенных в карбонатных коллекторах, играет все более существенную роль. Запасы нефти, приуроченные к карбонатным коллекторам с содержанием в них вязкой и высоковяз-

кой нефти, к настоящему времени составляют в мире более 30 % от всех разведанных запасов [1, 2]. В России запасы нефти в таких коллекторах составляют более 50 % от всех. Наиболее крупными активами с такими залежами являются: Восточный участок Оренбургского месторождения, Куюмбин-

ское и Западно-Чонское месторождения в Восточной Сибири, проект Багра в Ираке, Приразломное месторождение на шельфе Печорского моря [3].

В статье рассматривается месторождение А, продуктивные отложения которого преимущественно представлены крепкими трещиноватыми карбонатными породами рифейского возраста. Рифейские отложения сложены в нижней части терригенными отложениями (зелендуконская и вздрешевская толщи), перекрытыми глинисто-карбонатными отложениями мадринской толщи. Выше залегает около 2500 м отложений преимущественно карбонатного состава, состоящих из чередования карбонатных пачек, толщиной около 500 м каждая, и глинисто-карбонатных пачек, толщина каждой из которых составляет порядка 100–200 м. Карбонатные пачки на 90–95 % представлены доломитами и на 10–5 % – прослоями аргиллитов. В глинисто-карбонатных пачках прослой аргиллитов занимают от 30 до 70 % общей толщины. Мощность прослоев аргиллитов изменяется от первых миллиметров до нескольких метров [4].

В процессе формирования карбонатных пород-коллекторов решающее значение имеют как условия образования осадков, так и вторичные постседиментационные преобразования карбонатных пород. По совокупности геохимических признаков условий осадконакопления формирование свиты месторождения А предположительно происходило в морских опресненных условиях со значительными локальными влияниями пресноводных масс. Формирование ёмкостного пространства в карбонатных породах происходило на всех стадиях литогенеза. Первичная седиментационная структура карбонатных осадков предопределяет дальнейшее развитие постседиментационных процессов, что в совокупности окончательно формирует ёмкостные и фильтрационные свойства карбонатных пород. Первичная пористость в органогенных постройках значительно выше, чем в тонкозернистых иловых осадках и обусловлена наличием пустотного пространства в строматолитовых и водорослевых доломитах. Плотная упаковка первичных седиментационных илов и отсутствие органических остатков предопределяют их низкую пористость. Матрица практически непроницаема и ее пористость находится в пределах 0,1–1 % [5].

Следует отметить значительное влияние трещиноватости на условия фильтрации флюидов в карбонатных породах венда и рифея. Этим обусловлено преимущественное развитие в них коллекторов сложного типа: трещинно-поровых, порово-трещинных, трещеновато-кавернозных. Трещиноватость является одним из факторов, способствующих не только фильтрации углеводородов, но и образованию вторичной ёмкости. Многочисленными исследованиями, проведенными во Всероссийском нефтяном научно-исследовательском геологоразведочном институте (ВНИГРИ), установлено, что густота трещин с глубиной не возрастает, но увеличивается ее роль в формировании фильтрационно-

ёмкостных свойств. С глубиной возрастает и значение трещин как основных путей фильтрации. Как показывают результаты исследований, ёмкость трещин крайне низкая и в сильнотрещиноватых породах не превышает 0,03–0,05 % [6]. Поэтому трещины ёмкостью не являются, а служат в основном путями фильтрации углеводородов и косвенно принимают участие в образовании вторичных пор выщелачивания. Вторичные поры выщелачивания, развитые вдоль открытых трещин, составляют 0,5–2,5 %, в сильно трещиноватых породах достигают 5–6 % [7].

В табл. 1 представлены основные геологические характеристики месторождения А.

Таблица 1. Геологические характеристики месторождения А  
Table 1. Oilfield A geological characteristics

| Параметр<br>Parameter            | Характеристика<br>Characteristic                                 |                                            |
|----------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Фазовое состояние<br>Phase state | Нефтегазоконденсатная<br>Oil-gas-condensate                      |                                            |
| Тип залежи<br>Accumulation type  | Массивная, тектонически-экранированная<br>Massive, fault-bounded |                                            |
| Тип коллектора<br>Reservoir type | Литологический состав<br>Lithological composition                | Карбонатный<br>Carbonaceous                |
|                                  | По типу пустотного пространства<br>Voids                         | Кавернозно-трещинный<br>Cavernous-fissured |

Месторождение А относится к месторождениям очень сложного геологического строения со следующими характеристиками:

- высокая степень литолого-фациальной неоднородности;
- значительная дезинтегрированность;
- изотропия фильтрационных свойств;
- интенсивный обменный поток жидкости между трещинами и матрицей.

Данные параметры являются причиной недопущения радиального режима фильтрации. С одной стороны, радиальное течение может «маскироваться» влиянием эффекта ствола скважины либо линейным течением в случае скважины с трещиной. С другой стороны, радиальный режим притока может быть искажен проявлением граничных условий, таких как:

- интерференция с окружающими скважинами;
- наличие непроницаемой границы (геологический разлом, фациальное замещение);
- процессы, происходящие в стволе скважины;
- наличие газовой шапки (или другой границы постоянного давления).

Вследствие сложного характера потоков интерпретация результатов ГДИ в условиях карбонатного коллектора является не простой задачей. С целью устранения неоднозначности получаемой информации в данной статье предлагается разработка комплексного подхода к моделированию процесса проведения исследований и прогноза получаемых данных с помощью дизайна.

Данный метод позволяет:

- прогнозировать длительность работы на режиме;

- прогнозировать длительность остановки на КВД, при этом общая продолжительность ГДИ определяется с учетом наименьших потерь времени эксплуатации скважин и добычи углеводородов;
- учитывать технические и технологические условия проведения работ;
- определить наиболее часто проявляющиеся факторы и принять меры по уменьшению их негативного влияния на проведение ГДИ;
- оценить возможности получения фильтрационно-ёмкостных свойств (ФЕС) пласта и параметров скважины по КВД;
- оценить потери по добыче нефти.

В статье приводятся результаты анализа данных исследований трех добывающих скважин, которые вскрыли продуктивный горизонт, представленный карбонатными отложениями рифейского возраста. В 2018 г. на месторождении А, в рамках проекта пробной эксплуатации, планируется переиспытание скважин Т-23, Т-361, Т-388 с проведением ГДИ методом установившихся отборов и методом неустановившейся фильтрации (регистрация забойного давления после остановки скважины). После проведения ГДИ планируется запуск скважины в пробную эксплуатацию.

Дизайн гидродинамических исследований был разработан в программном продукте Saphir пакета Ecrin компании KAPPA Engineering [8]. В качестве исходной информации используются следующие данные:

Характеристика скважин-кандидатов

Первые гидродинамические исследования скважин Т-23, Т-361, Т-388 проводились в 2007 г. Вторичное вскрытие выполнено кумулятивной перфорацией ПКО-89С, плотность прострела для скважины Т-23 составила 14 отверстий/погонный метр, для скважин Т-361 и Т-388 – 20 отверстий/погонный метр. Для вызова притока было проведено несколько циклов свабирования, с созданием депрессии до 35 % от пластового давления, после чего скважина перешла в режим фонтанирования.

Для формирования дизайна исследования была использована реальная работа скважин. В табл. 2 представлены основные параметры скважин-кандидатов.

Таблица 2. Характеристика скважин

Table 2. Well characteristics

| Параметр/Parameter            | Характеристика/Characteristic |       |       |
|-------------------------------|-------------------------------|-------|-------|
| Скважина/Well                 | Т-23                          | Т-36  | Т-388 |
| Назначение/Purpose            | Разведочная/Exploratory       |       |       |
| Тип/Type                      | Вертикальная/Vertical         |       |       |
| Дебит, м³/сут/Flow rate, m³/d | 182,8                         | 309,0 | 136,0 |

PVT- свойства флюида, параметры пласта

В табл. 3, 4 представлены свойства флюидов и параметры пласта.

Таблица 3. Свойства флюидов

Table 3. Fluids properties

| Параметр<br>Parameter                                                               | Ед. изм.<br>Unit of measure | Т-23  | Т-361 | Т-388 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|
| Начальное пластовое давление<br>Initial reservoir pressure                          | кгс/см²<br>kp/cm²           | 216   | 200,6 | 200,6 |
| Вязкость пластовой нефти $\mu_o$<br>Formation oil viscosity                         | сПз<br>cPs                  | 1,332 | 1,06  | 1,06  |
| Объемный коэффициент нефти $B_o$<br>Formation volume factor                         | д.ед.<br>unit fraction      | 1,288 | 1,465 | 1,465 |
| Плотность нефти (пласт. усл.) $\rho_{o,п.у.}$<br>Oil density (reservoir conditions) | г/см³<br>g/cc               | 0,714 | 0,7   | 0,7   |
| Плотность нефти (станд. усл.) $\rho_{o,с.у.}$<br>Oil density (standard conditions)  | г/см³<br>g/cc               | 0,822 | 0,825 | 0,825 |
| Полная сжимаемость $C_t$<br>Total compressibility                                   | 1/МПа·10⁻⁴<br>1/MPa·10⁻⁴    | 18,3  | 18,3  | 18,3  |

Таблица 4. Параметры пласта

Table 4. Reservoir characteristics

| Параметр/Parameter                                               | Ед. изм.<br>Unit of measure | Значение<br>Value |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| Эффективная толщина пласта, $H_{эфф}$<br>Net thickness           | м/м                         | 93,2              |
| Средняя пористость коллектора, $\phi$<br>Mean reservoir porosity | д.ед.<br>unit fraction      | 0,01              |

Подбор оборудования

Для проведения ГДИ предполагается использование прибора «САМТ-02». Данный глубинный манометр-термометр предназначен для регистрации значений давления и температуры по стволу скважины и изменения их во времени в любой точке, например на забое при снятии кривой восстановления давления (КВД) [9]. Основными преимуществами приборы являются:

- скоростной режим замера для обеспечения оперативности исследования;
- регулирование режима работы и передача данных без разборки корпуса.

Таблица 5. Краткие технические характеристики «САМТ-02»

Table 5. «SAMT-02» technical characteristics summary

| Параметр/Parameter                                                                                      | Ед. изм.<br>Unit of measure | Значение<br>Value   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Диапазон измерения давления<br>Pressure measuring range                                                 | МПа/MPa                     | 0–60                |
| Предельно допустимые условия эксплуатации<br>Maximum permissible conditions of exploitation             | °C                          | –40...+125          |
| Минимальная дискретность измерения<br>Minimal measurement resolution                                    | с/с                         | 1/128               |
| Время непрерывной работы от свежей батареи<br>Running time of battery operation                         | Ед./Unit                    | до 1 года<br>1 year |
| Разрешающая способность по давлению<br>Resolving power by pressure                                      | МПа/MPa                     | 0,0001              |
| Максимальная скорость записи<br>Maximum-usable writing speed                                            | с/с                         | 1                   |
| Погрешность измерений давления от полной шкалы<br>Error of the pressure measurement of full scale range | %                           | 0,15                |

В качестве исходных данных для формирования дизайна исследования использовались характеристики оборудования, приведенные в табл. 5.

Формирование программы исследований

В статье рассматривается дизайн индикаторной диаграммы (ИД) с прямым и обратным ходом методом монотонно-ступенчатого изменения дебита.

В основе всех модификаций вариантов исследования с помощью ИД лежит метод установившихся отборов. Обязательными требованиями к проведению исследований методом установившихся отборов являются: полное восстановление давления в ходе остановки скважины и полная стабилизация на режиме [10]. Известно, что в случае низкопроницаемых коллекторов такой процесс требует длительного времени.

Исследование состоит из четырех режимов прямого хода (с минимального штуцера), остановки на КВД и двух режимов обратного хода. Режимы обратного хода применяются для контроля за очисткой скважины и ухудшением свойств призабойной зоны. Запись КВД после окончания прямого хода целесообразна, т. к. на последнем режиме прямого хода происходит работа с максимальным дебитом, что обуславливает максимальное значение производной давления при КВД. Таким образом, создаются наиболее благоприятные условия для очистки забоя от жидкости и механических примесей, что обеспечивает хорошее качество КВД [11, 12].

При проведении исследований для рассматриваемых скважин месторождения А методом установившихся отборов время стабилизации рассчитывается по формуле:

$$t_y = \frac{R_k^2}{4\chi},$$

где  $R_k$  – радиус контура питания, или половина расстояния до соседних скважин, м;  $\chi$  – пьезопроводность пласта,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Оценка продолжительности работы скважины на каждом режиме осуществляется на основе выхода скважины на установившийся режим. Коэффициент пьезопроводности пласта рассчитывается по формуле:

$$\chi = \frac{k}{\mu\beta^*},$$

где  $k$  – проницаемость пласта,  $\text{м}^2$ ;  $\mu$  – динамическая вязкость пластового флюида,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $\beta^*$  – упругость пласта,  $\text{Па}^{-1}$ .

В качестве исходных данных для построения дизайна приняты данные ГДИ, проведенного в 2007 г. (проницаемость, влияния ствола скважины (ВСС), дебит) [13]. При моделировании использовано нейтральное значение механического скин-фактора, равное 0. В табл. 6 представлены исходные данные и расчетное время, необходимое для работы скважины на каждом режиме.

На рис. 1–3 представлены модели дизайна исследований скважин Т-23, Т-361, Т-388. Согласно

результатам проведенного моделирования, для получения качественной ИД необходима работа скважины на каждом режиме (без учёта времени необходимого для смены режима) не менее:

- 42 ч для скважины Т-23;
- 17 ч для скважины Т-361;
- 19 ч для скважины Т-388.

Таблица 6. Рекомендуемые режимы работы скважины

Table 6. Well performance parameters

| Технология<br>Technology             | Штуцер, мм<br>Flow choke,<br>mm | Длительность, ч<br>Period, h | Расчетный<br>дебит, $\text{м}^3/\text{сут}$ .<br>Design<br>flowrate, $\text{m}^3/\text{d}$ |
|--------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Скважина Т-23/Well Т-23              |                                 |                              |                                                                                            |
| Очистка ПЗП<br>Bottom-hole treatment | 10                              | 24                           | 149,8                                                                                      |
| КВД/PBU                              |                                 |                              |                                                                                            |
| Прямой ход<br>Forward stroke         | 6                               | 42                           | 64,9                                                                                       |
|                                      | 8                               | 42                           | 113,2                                                                                      |
|                                      | 10                              | 42                           | 149,8                                                                                      |
|                                      | 12                              | 42                           | 182,8                                                                                      |
| КВД/PBU                              |                                 |                              |                                                                                            |
| Обратный ход<br>Return stroke        | 10                              | 42                           | 149,8                                                                                      |
|                                      | 8                               | 42                           | 113,2                                                                                      |
| Скважина Т-361/Well Т-361            |                                 |                              |                                                                                            |
| Очистка ПЗП<br>Bottom-hole treatment | 10                              | 24                           | 216                                                                                        |
| КВД/PBU                              |                                 |                              |                                                                                            |
| Прямой ход<br>Forward stroke         | 6                               | 17                           | 121,9                                                                                      |
|                                      | 8                               | 17                           | 166,1                                                                                      |
|                                      | 10                              | 17                           | 216                                                                                        |
|                                      | 12                              | 17                           | 309                                                                                        |
| КВД/PBU                              |                                 |                              |                                                                                            |
| Обратный ход<br>Return stroke        | 10                              | 17                           | 216                                                                                        |
|                                      | 8                               | 17                           | 166,1                                                                                      |
| Скважина Т-388 Well Т-388            |                                 |                              |                                                                                            |
| Очистка ПЗП<br>Bottom-hole treatment | 10                              | 24                           | 123                                                                                        |
| КВД/PBU                              |                                 |                              |                                                                                            |
| Прямой ход<br>Forward stroke         | 6                               | 19                           | 70                                                                                         |
|                                      | 8                               | 19                           | 93                                                                                         |
|                                      | 10                              | 19                           | 123                                                                                        |
|                                      | 12                              | 19                           | 136                                                                                        |
| КВД/PBU                              |                                 |                              |                                                                                            |
| Обратный ход<br>Return stroke        | 10                              | 19                           | 123                                                                                        |
|                                      | 8                               | 19                           | 93                                                                                         |

В результате численного моделирования были получены диагностические графики КВД. На рис. 4 представлен детализированный график для скважины Т-23.

Согласно выполненному моделированию, время окончания ВСС составило 12 часов, начало выхода на радиальный режим течения диагностируется спустя 35 часов.

С целью получения корректных результатов при интерпретации КВД на скважине Т-23 длительность радиального режима должна составить не менее 1/2 логарифмического цикла. С учётом указанного условия длительность регистрации КВД составит порядка 100 часов (4 суток).

В результате выполненного дизайна был произведен тщательный анализ исходных данных и про-

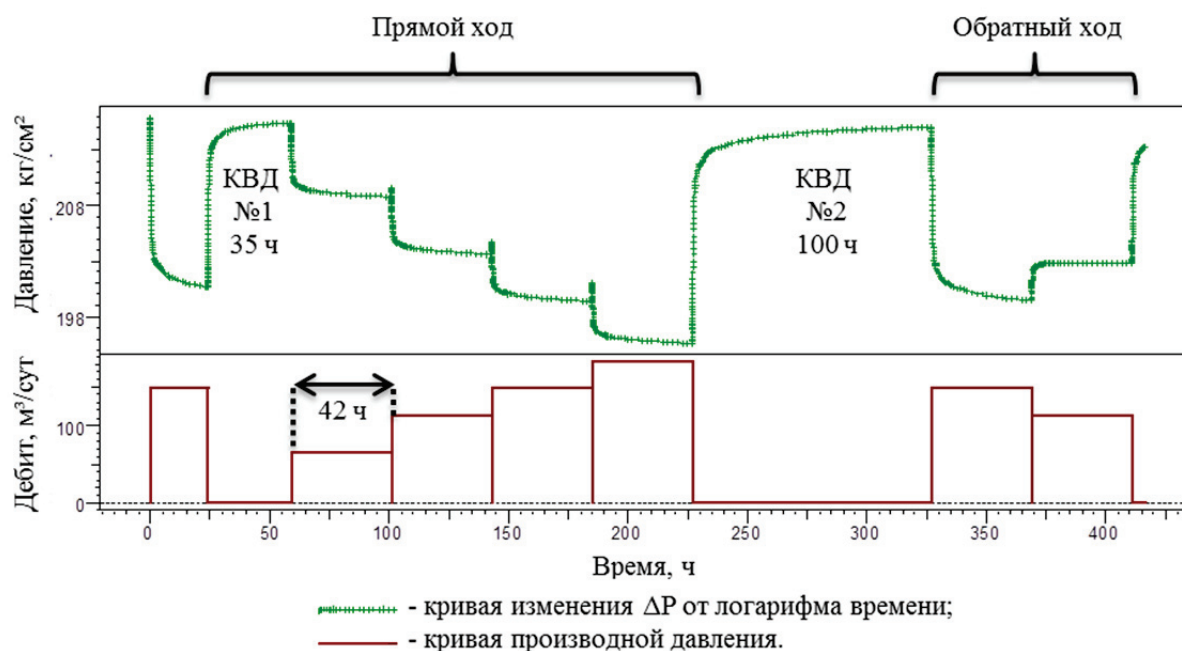


Рис. 1. Дизайн исследования скважины Т-23

Fig. 1. Research design of well T-23

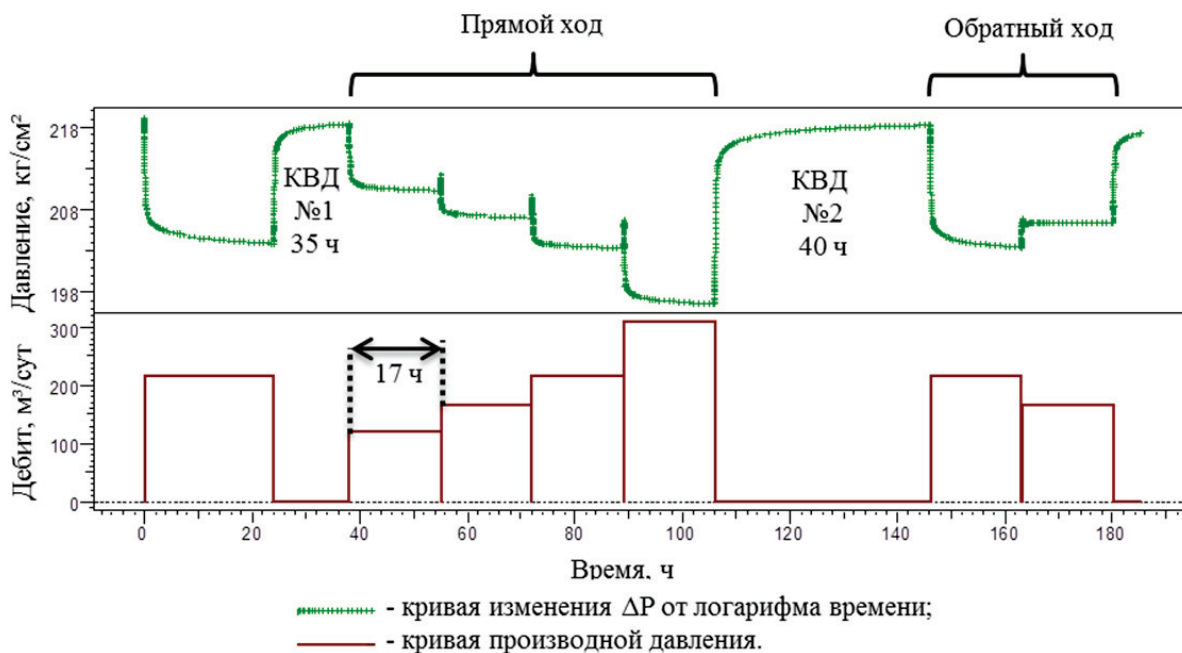


Рис. 2. Дизайн исследования скважины Т-361

Fig. 2. Research design of well T-361

изведено численное моделирование поведения забойного давления для скважин Т-23, Т-361, Т-388. По результатам моделирования исследования рекомендованная продолжительность исследования составляет:

- Т-23 – 100 ч;
- Т-361 – 40 ч;
- Т-388 – 35 ч.

Также в рамках данной работы удалось провести сопоставление дизайна исследования с реальными результатами испытания для скважины Т-23.

Необходимо отметить, что регистрация кривой восстановления давления проводилась в течении 144 часов – в соответствии с рекомендациями, указанными в РД 153–39.0–109–01.

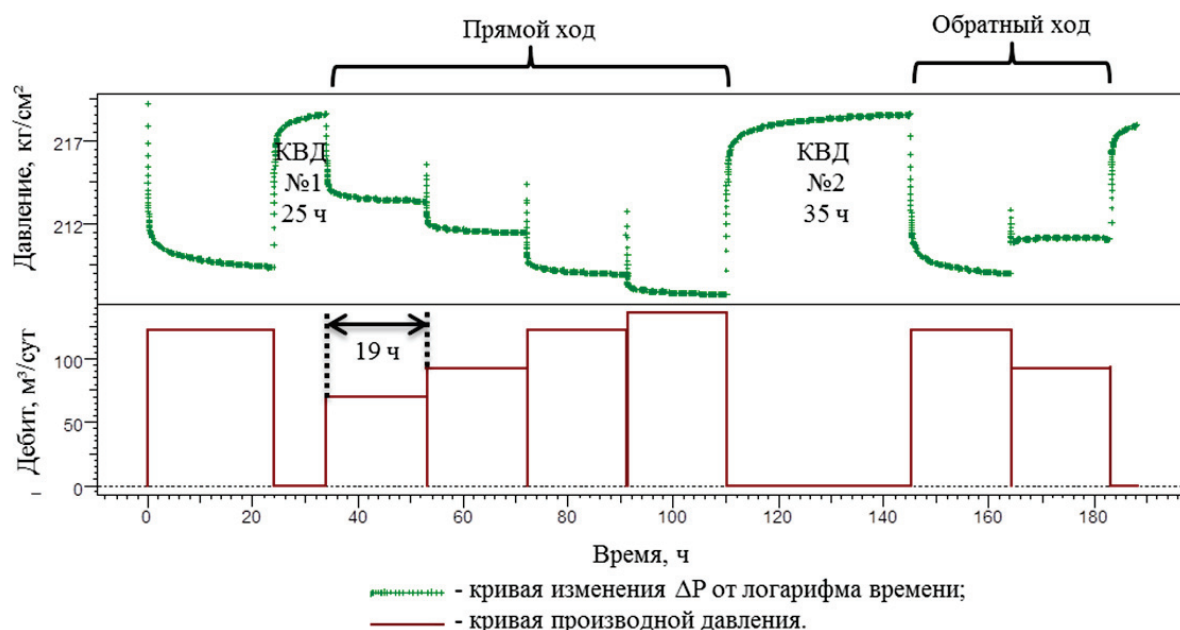


Рис. 3. Дизайн исследования скважины Т-388

Fig. 3. Research design of well T-388

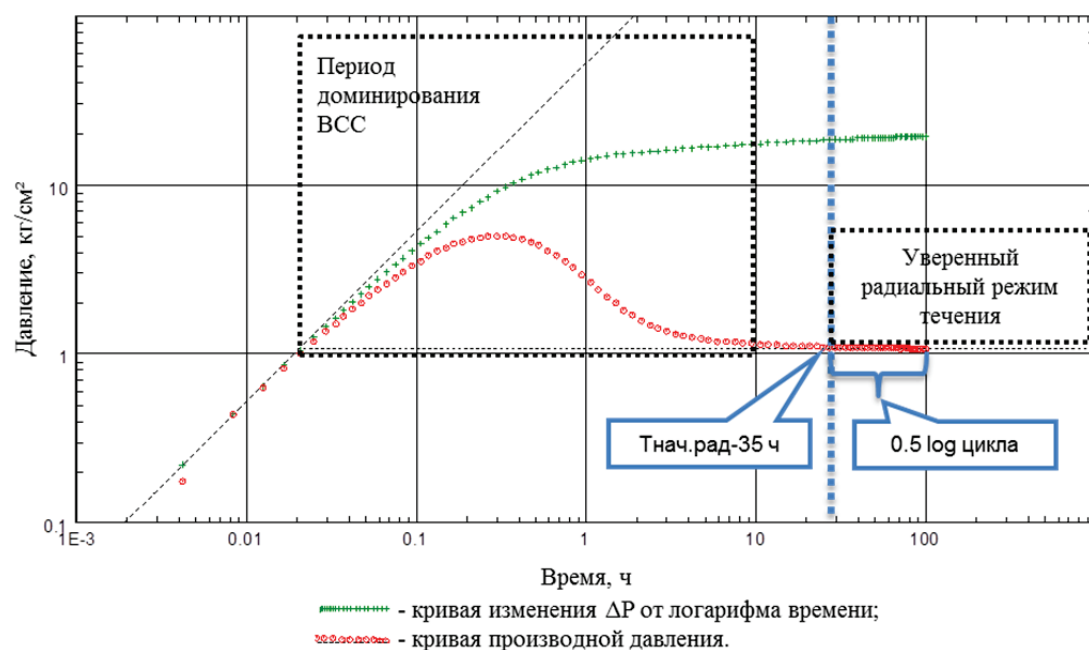


Рис. 4. Дизайн диагностического графика КВД скважины Т-23 в билигарифмических координатах

Fig. 4. Diagnostic chart design of well T-23 PBU in logarithmic coordinates

На полученном диагностическом графике математического моделирования КВД в билигарифмических координатах наблюдается длительный период влияния ствола скважины, осложненный фазовыми перераспределениями – 35 часов, время выхода на радиальное течение составляет порядка 38 часов.

Из рис. 6 видно, фактическое  $T_{нач. рад}$  – начало выхода на радиальный режим течения – диагностируется спустя 38 часов, при этом  $T_{нач. рад}$ , полу-

ченное в результате моделирования дизайна исследования, составило 35 часов. Вышеприведенные данные подтверждают высокую эффективность применения методики разработки комплексного подхода к моделированию процесса проведения исследований, основанного на создании дизайна.

#### Экономический эффект

В период планирования ГДИ на этапе опытно-промышленной эксплуатации скважин фактором

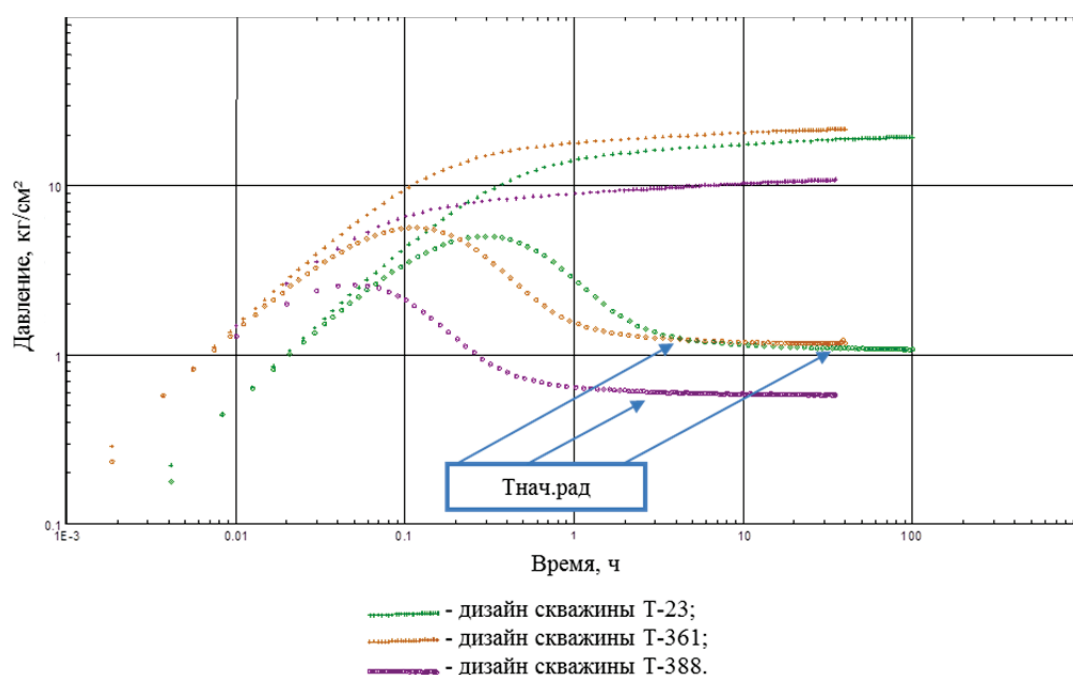


Рис. 5. Дизайн диагностического графика КВД скважин Т-23, Т-361, Т-388 в билогарифмических координатах

Fig. 5. Diagnostic chart design of wells T-23, T-361, T-388 PBU in logarithmic coordinates

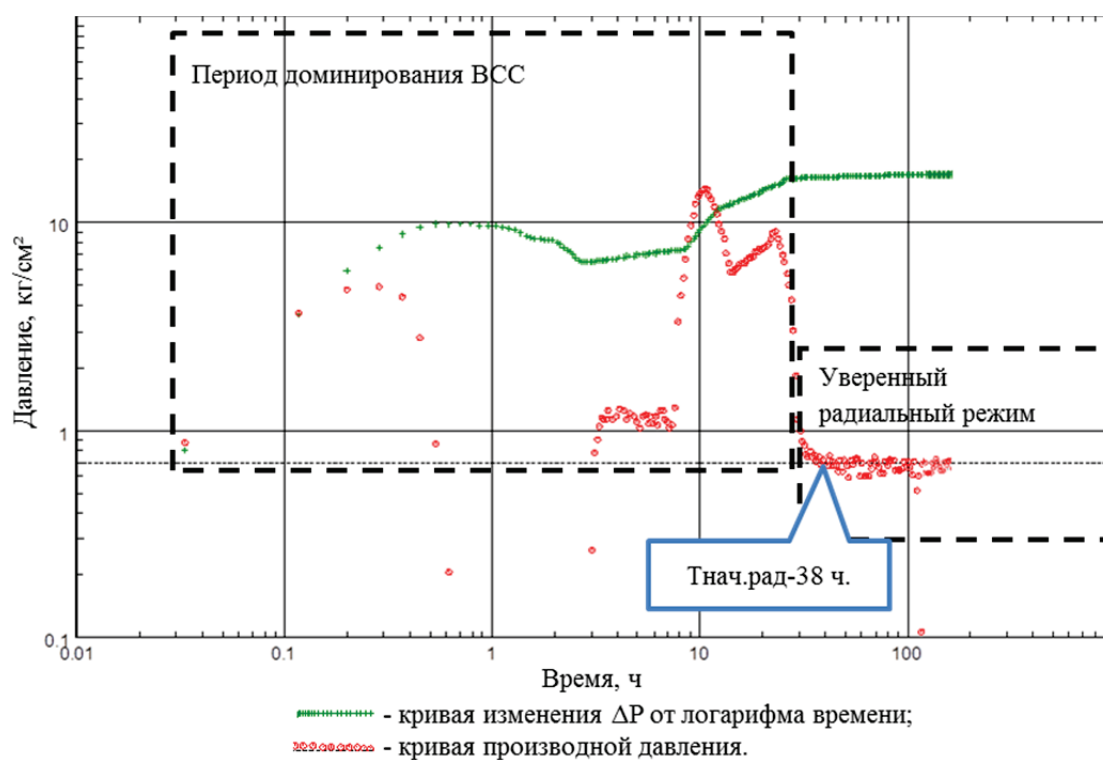


Рис. 6. Фактический диагностический график КВД скважины Т-23 в билогарифмических координатах

Fig. 6. Actual diagnostic chart of well T-23 PBU in logarithmic coordinates

для экономической оценки является время проведения исследований. Чем меньше период проведения ГДИ и, как следствие, период остановки скважины, тем проект выгоднее.

С целью оценки экономической эффективности представленного подхода был проведен сравнительный анализ. При сравнении использовались рекомендации, указанные в РД 153–39.0–109–01,

в соответствии с геологическими условиями, а также данные, полученные в результате моделирования дизайна исследования. Исходя из рекомендаций, указанных в РД, необходимое время эксплуатации скважины на одном режиме для коллектора с проницаемостью 0,05–0,01 мкм<sup>2</sup> составляет 96 часов, а время снятия КВД – 144 часа [14].

Исходные данные для расчета представлены в табл. 7.

Таблица 7. Исходные данные для экономического анализа

Table 7. Basic data for economic analysis

| Технические характеристики/Technical characteristics                                                                                                                 |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| Скважина/Well                                                                                                                                                        | T-23  | T-361 | T-388 |
| Дебит $Q_{\text{нефти}}$ , т/сут./Flow rate, tpd.                                                                                                                    | 150,3 | 254,0 | 111,8 |
| Время снятия кривой восстановления забойного давления, сут.:<br>Time of pressure buildup plot fixation, d:                                                           |       |       |       |
| Стандартная методика РД 153–39.0–109–01 $T_1$<br>Standard method Ruling document<br>153–39.0–109–01                                                                  | 6     | 6     | 6     |
| Методика тест-дизайна $T_2$<br>Method of test-design                                                                                                                 | 4,2   | 1,7   | 1,5   |
| Экономические макропараметры/Economic macroparameters                                                                                                                |       |       |       |
| Цена нефти $S_{\text{барр}}$ (среднее за год, по данным на февраль 2018 г.), \$/барр.<br>Oil price (average for a year, according to the February 2018 data), \$/bbl | 68,95 |       |       |
| Коэффициент барреляжа $K_{\text{барр}}$ (по данным Аналитического агентства АРГУС), барр/т<br>Bbl coefficient (according to the ARGUS analytic agency data), bbl/t   | 7,43  |       |       |

Как упоминалось выше, при рассмотрении стандартного подхода минимальное время снятия кривой восстановления забойного давления  $T_1=144$  часа (6 суток) принято для скважин с высокими устойчивыми дебитами и коллекторов с проницаемостью ниже 0,05–0,01 мкм<sup>2</sup>

Цена нефти  $S$ , \$/тонн [15, 16]:

$$S_{\text{тонн}} = S_{\text{барр}} \cdot K_{\text{барр}} = \\ = 68,95 \$ / \text{барр} \cdot 7,43 \text{ барр} / \text{т} = 512,30 \$ / \text{т}.$$

С учетом курса доллара (по данным на февраль 2018 г.)  $S_{\$}=57,66$  руб/\$, стоимость нефти  $S$ , тыс. р./т:

$$S = S_{\text{тонн}} \cdot S_{\$} = \\ = 512,30 \$ / \text{т} \cdot 57,66 \text{ руб} / \$ = 29,54 \text{ тыс. руб} / \text{т}.$$

Масса нефти, полученной в процессе проведения ГДИ, в зависимости от применяемой методики прогнозирования ГДИ, т:

$$M_n = Q_{\text{нефти}} T.$$

Экономический эффект при применении методики создания дизайна по сравнению со стандартным подходом рассчитывался по формуле [17–19]:

$$\Theta = (M_{n1} - M_{n2})S.$$

В табл. 8 представлены результаты экономических расчетов.

Из вышеприведенных данных следует, что экономический эффект от применения представленной

методики прогнозирования исследования, основанного на создании дизайна, в сравнении со стандартным подходом по РД 153–39.0–109–01 для рассматриваемых скважин месторождения N, составит:  $\Theta_1=7991,8$  тыс. руб.;  $\Theta_2=32\,263,6$  тыс. руб.;  $\Theta_3=14\,861,6$  тыс. руб.

Таблица 8. Результаты экономического сравнения методик

Table 8. Results of methods economic comparison

| Скважина<br>Well | Дебит, т/сут.<br>Flow rate, tpd | Длительность, сут.<br>Period, d |                            | Потери нефти, т<br>Oil losses, t |                            | Стоимость нефти,<br>тыс. руб./т<br>Oil price, tsd roubles/t | Эконом. эффект,<br>тыс. руб.<br>Economic benefit, tsd roubles |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
|                  |                                 | РД<br>Ruling document           | Тест-дизайн<br>Test-design | РД<br>Ruling document            | Тест-дизайн<br>Test-design |                                                             |                                                               |
| №                | $Q_{\text{нефти}}$              | $T_1$                           | $T_2$                      | $M_{n1}$                         | $M_{n2}$                   | $S$                                                         | $\Theta$                                                      |
| T-23             | 150,3                           | 6                               | 4,2                        | 901,8                            | 631,3                      | 29,54                                                       | 7 991,8                                                       |
| T-361            | 254,0                           | 6                               | 1,7                        | 1 524,0                          | 431,8                      |                                                             | 32 263,6                                                      |
| T-388            | 111,8                           | 6                               | 1,5                        | 670,8                            | 167,7                      |                                                             | 14 861,6                                                      |

Можно заключить, что методика создания дизайна исследования позволяет сократить срок проведения ГДИ на стадии планирования. Таким образом, период остановки скважины уменьшится, что позволит сократить потери на этапе опытно-промышленной эксплуатации скважин и получить дополнительную выгоду от реализации продукта (рис. 7).



Рис. 7. Результаты экономического сравнения методик

Fig. 7. Results of technical and economic comparison

## Выводы

В результате выполненного дизайна был произведен тщательный анализ исходных данных и численное моделирование поведения забойного давления в скважинах Т-23, Т-361, Т-388. По результатам моделирования исследования рекомендованная продолжительность исследования составила:

- Т-23 – 100 ч;
- Т-361 – 40 ч;
- Т-388 – 35 ч.

Потери по нефти для исследуемых скважин при остановке будут составлять:

- Т-23 – 631,3 т;
- Т-361 – 431,8 т;
- Т-388 – 167,7 т.

Для скважины Т-23 также был проведен анализ сопоставления с реальными данными исследования. В ходе данного анализа было установлено, что выбранный дизайн исследования и проведенные расчеты полностью подтверждаются.

В статье подтверждена экономическая целесообразность моделирования ГДИ, основанного на создании дизайна исследования. Уточнение времени проведения исследований по сравнению со стандартным подходом РД 153–39.0–109–01 позволяет сократить период остановки скважины и увеличить время добычи нефти на этапе опытно-промышленной эксплуатации. Усредненное значение экономического эффекта на основе данных по трем разведочным скважинам месторождения А составило 20 292,7 тыс. р.

В условиях сформированной системы разработки месторождений для повышения качества ГДИС требуются: обязательная точная постановка целей гидродинамического исследования в адресной скважине с определением возможностей того или иного метода ГДИС, а также обязательное соблюдение технологии исследования, изложенной в дизайне. Это позволит значительно повысить качество ГДИС, оптимизировать затраты на исследования и потери по нефти, компенсируя их высокой точностью полученной информации. Предложенные в статье решения позволяют оценить целесооб-

разность и экономическую эффективность планируемых работ.

Очевидно, что для проведения качественных исследований необходимо планировать ГДИС на этапе, предшествующем замерам. Иными словами, перед выполнением любого ГДИС следует выполнить его дизайн либо в специализированном программном продукте, либо по эмпирическим формулам [20–23].

Важно отметить, что как бы идеально не было спланировано исследование, необходимо обеспечить технические (подготовка скважины, выбор работоспособного исследовательского оборудования) и технологические (соблюдение длительности исследования) условия проведения работ в адресной скважине каждой из ответственных сторон (нефтяной компанией и сервисным предприятием). Кроме того, необходимо установить, что именно может помешать получению отчетливо диагностируемого участка радиального течения. С одной стороны, радиальное течение может «маскироваться» влиянием эффекта ствола скважины либо линейным течением в случае скважины с трещиной. С другой стороны, радиальный режим притока может быть искажен проявлением следующих граничных условий: 1) интерференции с окружающими скважинами; 2) геологического разлома (наличие непроницаемой границы); 3) газовой шапки (границы постоянного давления).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидродинамические исследования скважин: анализ и интерпретация данных / Т.А. Деева, М.Р. Камарудинов, Т.Е. Кулагина, П.В. Мангазеев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 243 с.
2. Покрепин Б.В. Разработка нефтяных и газовых месторождений. – Волгоград: Изд-во «Ин-Фолио», 2008. – 192 с.
3. Алтунина Л.К., Кувшинов В.А., Кувшинов И.В. Увеличение нефтеотдачи в карбонатных коллекторах // Деловой журнал NEFTEGAZ.RU. – 2017. – № 3. – С. 99–103.
4. Васильева К.Ю. Стадийность постседиментационных изменений карбонатных пород рифея-венда Куломбинского месторождения и ее связь с геологической эволюцией Байкитской антеклизы (юго-запад Сибирской платформы). – СПб: СПбГУ, 2017. – 138 с.
5. Методические рекомендации по изучению и прогнозу коллекторов нефти и газа сложного типа. – Л.: Недра, 1989. – 103 с.
6. Интерпретация и анализ результатов исследований коллектора трещинно-кавернозно-порового типа / В.А. Байков, О.В. Емченко, А.В. Зайнуллин, А.Я. Давлетбаев // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». – 2007. – № 5. – С. 30–34.
7. Белоновская Л.Г. Трещиноватость карбоновых пород и разработанные во ВНИГРИ основы поисков трещинных коллекторов нефти и газа // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2006. – Т. 1. URL: <http://www.ngtp.ru/rub/10/04.pdf>
8. Houze O., Viturat D., Fjaere O.S. Dynamic Data Analysis v4.12.02 // The Kappa Journal. – 2011. – V. 10 – № 3. – P. 530–557.
9. Манометры-термометры глубинные «САМТ-02–25-d32», «САМТ-02–40-d32», «САМТ-02–60-d32». Руководство по эксплуатации. – М.: Сиям, 2010. – 13 с.
10. Earlaugher R.C. Jr., Kerch K.M. Analysis of short-time transient test data by type-curve matching // Journal of petroleum technologies. – 1974. – V. 26. – P. 793–800.
11. Gringarten A.C. Well Test Analysis in Practice // The way ahead (TWA) Journal. – 2012. – V. 36. – № 8. – P. 10–15.
12. Horne R.N. Modern Well Test Analysis. A computer Aided Approach // The Petroway Journal of Science. – 1990. – V. 12. – № 3. – P. 180–185.
13. Gao B. Pressure Transient Analysis of a Well Penetrating a Filled Cavity in Naturally Fractured Carbonate Reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering – 2016. – V. 24. – P. 392–403.
14. Руководящий документ РД 153–39.0–109–01. Методические указания по комплексированию и этапности выполнения геофизических, гидродинамических и геохимических исследований нефтяных и нефтегазовых месторождений (утв. Приказом Минэнерго России от 5 февраля 2002 г. N 30). – М.: Наука, 2002. – 95 с.
15. Патрушева Е.Г. Инвестиционный менеджмент. – Ярославль: ЯрГУ, 2017. – 120 с.
16. Кочетков А.А. Экономическая теория. – М.: Дашков и К, 2016. – 696 с.
17. Давыдова А.Е., Гроо А.А. Разработка расчетного комплекса поверхностного обустройства 0-d уровня // Сборник докладов VIII Региональной научно-технической конференции молодых специалистов ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть». – Красноярск, 2016. – С. 73–78.
18. Расчет экономической эффективности новых технологических процессов / И.М. Бабук, А.А. Королько, С.И. Адаменкова, Е.Н. Костюкевич. – Минск: БНТУ, 2010. – 56 с.
19. Impact of Oil Prices on Nominal Exchange Rate: Evidence from Ghana / G. Acka, A. Mohammed, J. Ampomah, D. Oppong, O. Sampah // The International Journal of Business & Management. – 2017. – V. 73. – P. 269–281.
20. Bourde D. Well Test Analysis: the Use of Advanced Interpretation Models. – Amsterdam, Netherlands: Elsevier science, 2002. – 461 p.

21. Economides M., Daniel H. Petroleum production systems. – Upper Saddle River: Prentice Hall Inc, 1994. – 607 p.
22. Adedapo A., Ayham A. A Cohesive Approach at Estimating Water Saturation in a Low-Resistivity Pay Carbonate Reservoir and Its Validation // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2017. – V. 67. – P. 306–320.
23. Arbab B., Jahani D., Movahed B. Reservoir Characterization of Carbonate in Low Resistivity Pays Zones in the Buwaib Formation, Persian Gulf // Open Journal of Geology. – 2017. – V. 22. – P. 1441–1451.

*Поступила 16.11.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Давыдова А.Е.**, аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института нефти и газа Сибирского Федерального университета; главный специалист департамента проектирования разработки ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть».

**Щуренко А.А.**, аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института нефти и газа Сибирского Федерального университета; главный специалист департамента проектирования разработки ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть».

**Дадакин Н.М.**, аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института нефти и газа Сибирского Федерального университета; главный инженер проекта департамента проектирования разработки ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть».

**Шуталев А.Д.**, аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института нефти и газа Сибирского Федерального университета; главный специалист департамента проектирования разработки ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть».

**Квеско Б.Б.**, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Института нефти и газа Сибирского Федерального университета.

UDC 622.276

## WELL TESTING DESIGN DEVELOPMENT IN CARBONATE RESERVOIR

**Anastasiya E. Davydova**<sup>1,2</sup>,  
DavydovaAE@knipi.rosneft.ru

**Alexander A. Shchurenko**<sup>1,2</sup>,  
ShchurenkoAA@knipi.rosneft.ru

**Nikita M. Dadakin**<sup>1,2</sup>,  
DadakinNM@knipi.rosneft.ru

**Artem D. Shutalev**<sup>1,2</sup>,  
ShutalevAD@knipi.rosneft.ru

**Bronislav B. Kvesko**<sup>1</sup>,  
kveskobb@gmail.com

<sup>1</sup> Siberian Federal University,  
79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia

<sup>2</sup> LLC «RN-KrasnoyarskNIPlneft»,  
24 v, Partizan Zheleznyak street, Krasnoyarsk, 660022, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to improve the methods of well testing due to the ambiguous interpretation of the results in a carbonate reservoir. Priorities in well testing are the maximum quality of the information obtained on the reservoir filtration and reservoir properties and the minimum loss of oil production during the shutdown of wells for research. In order to perform these tasks, it is important to develop the design of the well testing proposed in the article. The design will provide an integrated approach to modeling the process of conducting research and forecasting the data received.

**The main aim** of the research is to develop the design of well testing in order to optimize the time of the research and reduce the period of shutdown of wells at the stage of pilot operation, as well as to confirm the economic effectiveness of the presented methodology.

**Objects:** wells T-23, T-361, T-388 of oilfield A, the productive deposits of which are mainly represented by strong cavernous-fissured carbonate rocks of Riphean age.

**Methods.** The set research tasks were solved theoretically and experimentally under field conditions. At the same time, the analysis of publications on this issue was carried out; field hydrodynamic studies of wells that open a low permeable carbonate reservoir were conducted; simulation of hydrodynamic studies was carried out, comparative calculations were carried out for processing the results using the Saphir software package of KAPPA Engineering.

**Results.** This article presents the results of developing the design of hydrodynamic studies in a carbonate reservoir. The data of hydrodynamic studies for 12 wells operating Riphean carbonate sediments were analyzed for 2005–2008, the results for three wells: T-23, T-361, T-388, are presented. The technique of simulation of hydrodynamic researches in the software complex Saphir of the company «KAPPA Engineering» is presented. The paper introduces the example of calculation of the stabilization time in the study of the well by the method of steady-state sampling, as well as estimation of the optimum time for recording the pressure recovery curve. Also, the article compares the standard methodology used for testing a well – RD (ruling document) 153–39.0–109–01 «Methodological guidelines for the integration and phasing of geophysical, hydrodynamic and geochemical studies of oil and oil and gas fields» with that presented in the article. Based on this comparison, the economic efficiency was established.

### Key words:

Well testing, build-up test, design, duration of well investigation, carbonate reservoir, oil and gas field.

### REFERENCES

- Deeva T.A., Kamartdinov M.R., Kulagina T.E., Mangazeev P.V. *Gidrodinamicheskie issledovaniya skvazhin: analiz i interpretatsiya dannykh* [Well test: analysis and interpretation of data]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2009. 243 p.
- Pokrepin B.V. *Razrabotka neftyanykh i gasovykh mestorozhdeniy* [Development of oil and gas fields]. Volgograd, In-Folio Publ., 2008. 192 p.
- Altunina L.K., Kuvshinov V.A., Kuvshinov I.V. Uvelichenie nefteotdachi v karbonatnykh kolektorakh [Oil recovery increase in carbonate reservoirs]. *Bizness zhurnal neftegaz.ru*, 2017, vol. 47, no. 3, pp. 99–103.
- Vasilieva K.Yu. *Stadiynost postsedimentatsionnykh izmeneniy karbonatnykh porod rifeya – venda Kuymbinskogo mestorozhdeniya i ee svyaz s geologicheskoy evolyutsiyey Baikitskoy anteklizy (yugo-zapad Sibirskoy platformy)* [Stages of post-sedimentation changes in the carbonate rocks of the Riphean-Vendian of the Kuyumba deposit and its relationship to the geological evolution of the Baikite antecline (southwest of the Siberian platform)]. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University Publ., 2017. 138 p.
- Metodicheskie rekomendatsii po izucheniyu i prognozu kollektorov nefti i gaza slozhnogo tipa* [Methodological recommendations for the study and forecast of oil and gas collectors of complex type]. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 1989. 103 p.
- Baikov V.A., Emchenko O.V., Zaynulin A.V., Davletbaev A.Ya. Interpretatsiya i analiz rezultatov issledovaniy kolektora trezhinno-kavernozno-porovogo tipa [Interpretation and analysis of the results of investigations of the reservoir of a crack-cavernous-pore type]. *Nauchno-tehnicheskii vestnik*, 2007, vol. 10, pp. 30–34.

7. Belonovskaya L.G. Treshchinovatost karbonatnykh porod i razrabotannye vo VNIGRI osnovy poiskov treshchinnykh kollektorov nefti i gaza [Fracture of carbon rocks and the foundations of the search for fractured reservoirs of oil and gas developed in VNI-GRI]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2006, no. 8, pp. 9–13.
8. Houze O., Viturat D., Fjaere O.S. Dynamic Data Analysis v4.12.02. *The Kappa Journal*, 2011, vol. 10, no. 3, pp. 530–557.
9. *Manometry-termometry glubinnye «SAMT-02-25-d32», «SAMT-02-40-d32», «SAMT-02-60-d32»* [Manometers-thermometers «SAMT-02-25-d32», «SAMT-02-40-d32», «SAMT-02-60-d32»]. Moscow, Siam Publ., 2010. 13 p.
10. Earlaugher R.C. Jr., Kerch K.M. Analysis of short-time transient test data by type-curve matching. *Journal of petroleum technologies*, 1974, vol. 26, pp. 793–800.
11. Gringarten A.C. Well Test Analysis in Practice. *The way ahead (TWA) Journal*, 2012, vol. 36, no. 8, pp. 10–15.
12. Horne R.N. Modern Well Test Analysis. A computer Aided Approach. *The Petroleum Journal of Science*, 1990, vol. 12, no. 3, pp. 180–185.
13. Gao B. Pressure Transient Analysis of a Well Penetrating a Filled Cavity in Naturally Fractured Carbonate Reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, vol. 24, pp. 392–403.
14. *Rukovodnyashchiy dokument RD 153–39.0–109–01. Metodicheskie ukazaniya po kompleksirovaniyu i etapnosti vypolneniya geofizicheskikh, gidrodinamicheskikh i geokhimicheskikh issledovaniy neftyanykh i neftegazovykh mestorogdeniy* [Ruling document RD 153–39.0–109–01. Methodical instructions on complexation and phasing of geophysical, hydrodynamic and geochemical studies of oil and oil and gas fields]. Moscow, Nauka Publ., 2002. 95 p.
15. Patrusheva E.G. *Investitsionnyy menedzhment* [Investment management]. Yaroslavl, Yaroslavl State University Publ., 2017. 120 p.
16. Kochetkov A.A. *Ekonomicheskaya teoriya* [Economic Theory]. Moscow, Dashkov and K Publ., 2016. 696 p.
17. Davydova A.E., Groo A.A. *Razrabotka rashchetnogo kompleksa poverkhnostnogo obustroystva 0-d urovnya* [Calculation complex development of 0-d level infrastructure development]. Krasnoyarsk, KrasnoyarskNIPIneft Publ., 2016. 108 p.
18. Babuk I.M., Korolko A.A., Adamenkova S.I., Kostyukevich E.N. *Raschet ekonomicheskoy effektivnosti novykh tekhnologicheskikh protsessov* [Calculation of economic efficiency of new technological processes]. Minsk, BNTU Publ., 2010. 56 p.
19. Acka G., Mohammed A., Ampomah J., Oppong D., Sampah O. Impact of Oil Prices on Nominal Exchange Rate: Evidence from Ghana. *The International Journal of Business & Management*, 2017, vol. 73, pp. 269–281.
20. Bourde D. *Well Test Analysis: the Use of Advanced Interpretation Models*. Amsterdam, Netherlands, Elsevier science, 2002. 461 p.
21. Economides M., Daniel H. *Petroleum production systems*. Upper Saddle River, Prentice Hall Inc, 1994. 607 p.
22. Adedapo A., Ayham A. A Cohesive Approach at Estimating Water Saturation in a Low-Resistivity Pay Carbonate Reservoir and Its Validation. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2017, vol. 67, pp. 306–320.
23. Arbab B., Jahani D., Movahed B. Reservoir Characterization of Carbonate in Low Resistivity Pays Zones in the Buwaib Formation, Persian Gulf. *Open Journal of Geology*, 2017, vol. 22, pp. 1441–1451.

Received: 16 November 2018.

#### Information about the authors

**Anastasiya E. Davydova**, graduate student, Siberian Federal University; chief specialist, LLC «RN-KrasnoyarskNIPIneft».

**Alexander A. Shchurenko**, graduate student, Siberian Federal University; chief specialist, LLC «RN-KrasnoyarskNIPIneft».

**Nikita M. Dadakin**, graduate student, Siberian Federal University; chief project engineer, LLC «RN-KrasnoyarskNIPIneft».

**Artem D. Shutalev**, graduate student, Siberian Federal University; chief project engineer, LLC «RN-KrasnoyarskNIPIneft».

**Bronislav B. Kvesko**, Cand. Sc., professor, Siberian Federal University.

УДК 550.837.74

## ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА РАДИОКИП ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА В РУДНЫХ РАЙОНАХ

Давыдов Вадим Анатольевич,  
davyde@yandex.ru

Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН,  
Россия, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 100.

**Актуальность** исследования обусловлена экономическим интересом к использованию простых, эффективных и высокопроизводительных геофизических технологий для поиска и разведки рудных месторождений.

**Цель:** оценить информативность геоэлектрических разрезов, построенных по импедансным данным метода радиоконпарации и пеленгации (радиокип), при изучении коры выветривания и кровли коренных пород в различных геологических условиях.

**Объекты** исследования находятся в Дегтярско-Полевском рудном районе Среднего Урала, в приконтактной зоне Серовско-Мауского разлома, разделяющего комплексы пород Тагильского прогиба и Восточно-Уральского поднятия. Геофизические профили располагались на территории Крылатовского золото-кварцевого месторождения, Чусовского медно-колчеданного месторождения, Кунгурском и Волчихинском участках.

**Методы.** Полевые измерения методом радиокип проводились широкополосным приемником «ОМАР-2м» со стелющейся линией и индукционным датчиком переменного магнитного поля. Осуществлялись наблюдения ортогональных компонент поля сигналов сверхдлинноволновых радиостанций. В качестве сравнения использовались результаты аудиоманнитотеллурических и вертикальных электрических зондирований, а также информация по геологическому изучению территории. Количественная обработка электроразведочных данных осуществлялась с применением программного обеспечения, разработанного в различных научных учреждениях.

**Результаты.** Проведенные исследования показали хорошую сопоставимость результатов инверсии радиокип сверхдлинноволновых радиостанций с геоэлектрическими разрезами, полученными другими методами электромагнитных зондирований. Радиокип не может отобразить всех особенностей строения верхней части разреза, но позволяет выделить характерные черты коренных пород и определить основную границу между рыхлыми отложениями и основанием разреза. Полученные результаты указывают на принципиальную возможность обнаружения глубокозалегающих рудных объектов с помощью метода радиокип сверхдлинноволновых радиостанций. Метод отличается хорошей производительностью, поэтому можно добиться высокой детальности наблюдений при небольших затратах. Геоэлектрические разрезы радиокип могут использоваться для оперативной оценки общей мощности коры выветривания и выбора точек зондирований другими электромагнитными методами для уточнения геологической обстановки.

### Ключевые слова:

Метод радиоконпарации и пеленгации сверхдлинноволновых радиостанций, компоненты электромагнитного поля, импеданс, геоэлектрический разрез, рудные месторождения.

### Введение

Метод радиоконпарации и пеленгации (радиокип) удаленных радиостанций был разработан в 50-х гг. XX в. Основные принципы и примеры применения метода радиокип достаточно подробно изложены в ряде отечественных и зарубежных публикаций [1–4]. Поначалу использовались средневолновые (СВ) и длинноволновые (ДВ) вещательные станции, с середины 60-х гг. используются сигналы специальных сверхдлинноволновых радиостанций (СДВР). Диапазон частот СДВР находится в пределах 10–30 кГц, что позволяет исследовать разрез на глубину до 50–100 м. Станции применяются в системах навигации и радиосвязи, а также для передачи сигналов эталонных частот и единого времени. Наиболее мощные радиостанции уверенно принимаются на расстоянии свыше 10000 км. За рубежом радиокип СДВР называется методом VLF (Very Low Frequency) – «очень низких частот». Модификация радиокип СДВР с измерением только магнитных компонент носит обозначение VLF-EM (ElectroMagnetic), для изучения импеданса электромагнитных полей служит вариант VLF-R (Resistivity). В VLF-EM обычно измеряют отношение между вертикальной ( $H_z$ ) и тан-

генсальной составляющей горизонтального магнитного поля ( $H_\phi$ ), называемого типпером. Получаемые данные служат для определения параметров эллипса поляризации магнитного поля: угла наклона и эллиптичности, которые напрямую связаны с реальными и мнимыми компонентами типпера [5]. Чтобы связать аномалии типпера с проводящими и непроводящими объектами были предложены специальные методы фильтрации профильных данных. Для площадного картирования обычно используется фильтрация Фрейзера [6], а для построения псевдоразрезов проводимости – Karous-Hjelt (KH) фильтрация [7]. Развитие данной технологии шло в направлении повышения устойчивости от технических и геологических помех. Одним из предложенных способов было использование эмпирической модовой декомпозиции (EMD) сигналов на основе преобразований Гильберта–Хуанга (Hilbert–Huang transform – HHT) [8, 9]. Проведенный анализ возможностей HHT на примере геофизических данных показал, что эмпирическая модовая декомпозиция обеспечивает устойчивую адаптивную очистку сигналов от шумов и более высокую разрешающую способность, чем типовые виды частотной фильтрации

[10]. Другим направлением исследований типпера являлось получение удельного электрического сопротивления (УЭС) среды. В результате был разработан трансформационный фильтр, который преобразует измеренные отношения  $H_z/H_\phi$  в кажущиеся сопротивления [11]. Чуть позднее был предложен улучшенный вариант этого способа, позволяющий получить тензор импеданса от магнитных полей с помощью преобразований Гильберта [12]. Однако более достоверным и надежным способом получения данных об электрических свойствах разреза являются прямые измерения импеданса, с дальнейшим пересчетом в УЭС, реализуемые в варианте *VLF-R*. В этом случае проводится регистрация электрической компоненты поля  $E_r$  в направлении станции и поперечная ей магнитная составляющая  $H_\phi$ . Отношение этих компонент сигнала определяет импеданс (волновое сопротивление) среды  $Z=E_r/H_\phi$ , пропорциональный удельному электрическому сопротивлению подстилающих пород. В отечественной литературе модификацию радиокип *VLF-R* иногда называют радиоэлектромагнитным профилированием (РЭМП). Импедансные измерения позволяют получать большие массивы кажущихся сопротивлений по площади работ, поэтому часто используются при геологическом картировании. При этом профильные наблюдения можно пересчитать в двухслойные геоэлектрические разрезы с помощью оптимизированных алгоритмов обработки магнитотеллурических данных. Данная технология интерпретации набирает все большую популярность у ряда исследователей [13, 14], а для повышения достоверности опробуется методика совместной обработке импедансных данных и типпера [15]. Целью представленной работы является оценка информативности геоэлектрических разрезов радиокип при изучении коры выветривания и кровли коренных пород в различных геологических условиях. К основным задачам исследований относится сравнение результатов радиокип с другими методами электромагнитных зондирований в рудных районах Среднего Урала.

#### Методика работ

Полевые измерения методом радиокип проводились двухканальным универсальным приемником «ОМАР-2м» оригинальной разработки [16]. Использовались наблюдения ортогональных компонент электромагнитного поля сигналов сверхдлинноволновых радиостанций системы дальней навигации РСДН-20 «Альфа». Характер работы станций и особенности принимаемых сигналов рассматривались ранее в [17]. Электрическая составляющая  $E_r$  снималась с симметричной стелющейся линии, протягиваемой вдоль профиля. Ортогональная магнитная компонента  $H_\phi$  измерялась с помощью малогабаритной ферритовой антенны, настроенной в резонанс на частоту станции 12,65 кГц. Сигналы электрического и магнитного каналов усиливались до необходимого уровня и записывались в цифровой регистратор. Одновремен-

ная регистрация составляющих электромагнитного поля проводилась в течении 20–30 секунд на каждой точке. Результаты измерений, в виде модуля и фазы импеданса, пересчитывались в кажущиеся сопротивления  $\rho_k$  по формуле, принятой в магнитотеллурике [18]:

$$\rho_k = (1/\omega\mu) \cdot |Z|^2 = (1/\omega\mu) \cdot |E_r/H_\phi|^2,$$

$$\varphi_z = \varphi_E - \varphi_H,$$

где  $\mu=\mu_0$  – магнитная проницаемость свободного пространства;  $\omega$  – угловая частота измерения;  $Z$  – поверхностный импеданс;  $\varphi_z$  – фаза импеданса;  $\varphi_E$ ,  $\varphi_H$  – фазы электрической и магнитной компонент сигналов.

Полученные значения кажущихся сопротивлений (КС) и фаз импеданса можно определенным способом преобразовать в параметры двухслойного разреза. В однородном изотропном пространстве КС является истинным удельным электрическим сопротивлением, а фазовый сдвиг между горизонтальными компонентами электрического и магнитного полей равен  $45^\circ$ . В слоистой среде фазовый сдвиг изменяется от нуля до  $90^\circ$  в зависимости от величины и контрастности сопротивления слоев. Для проведения инверсии импедансных данных радиокип СДВР использовалась программа 2LAY-INV, разработанная в финском университете Оулу [19]. Она основана на традиционных алгоритмах обработки магнитотеллурических данных, оптимизированных для двухслойной модели среды. Ранее проведенные исследования показали, что инверсия данных радиокип СДВР позволяет получать вполне адекватные геоэлектрические разрезы. В большинстве случаев они соответствуют двухслойной модели с хорошо проводящими поверхностными отложениями и высокоомными коренными породами. Недостаток технологии заключается в замещении нескольких осадочных слоев эквивалентным слоем, что делает невозможным расчленение рыхлых отложений и вносит искажения в получаемые значения УЭС [20]. К достоинствам программы 2LAYINV относится вычисление минимальных и максимальных значений параметров разреза, укладываемых в модель инверсии с учетом погрешности полевых данных. Это позволяет получить «вероятностный» характер изменений удельных электрических сопротивлений и глубины залегания границы. Чтобы оценить достоверность получаемых разрезов радиокип, на эталонных геологических объектах проводились исследования другими электроразведочными методами. К ним, в первую очередь, относятся аудиоманнитотеллурические (АМТ) и вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ). Полевые работы ВЭЗ осуществлялись по стандартной методике наблюдений [21], для интерпретации использовалась известная программа IPI2Win, разработанная на кафедре геофизики МГУ им. М.В. Ломоносова. АМТ измерения выполнялись в варианте экспресс-зондирований, результаты трансформировались в глубинные разрезы с учетом априорной информации о верхней части разреза [22].

## Результаты исследований

Крылатовский рудник

Исследуемый участок находится в 35 км на юго-запад от г. Екатеринбурга, в районе Крылатовско-Чесноковского месторождения золота, известного с 1803 г. Район работ располагается в пределах южного окончания Новоалексеевского плагиогранитного массива, ограниченного с запада региональным Серовско-Маукским (Дегтярским) разломом, с востока – Крылатовским разрывом. Массив формировался в тектонически активной зоне, что подтверждается развитием в нем многочисленных разрывных нарушений и мощных зон рассланцевания. Впоследствии он подвергся многостадийному гидротермальному воздействию. Крылатовское месторождение представляет собой серию минерализованных кварцевых жил, залегающих в кварц-серпичитовых метасоматитах (сланцеватых березитах) [23]. Известны несколько крупных золотонос-

ных жил, вытянутых в меридиональном направлении, длиной 550–2350 м и мощностью 2,5...6,7 м, являвшихся предметом шахтной добычи Крылатовского рудника. Содержание золота неравномерное, связано в основном с небольшим количеством сульфидов, поэтому руды использовались в качестве золотоносных кварцевых флюсов. На момент закрытия на руднике функционировали три шахты: Центральная (490 м), Южная Вентиляционная (190 м) и Северная Вентиляционная (370 м) [24]. Крылатовский рудник прекратил свою работу в 2006 г., а через два года произошло полное затопление горных выработок с выходом шахтных вод на поверхность земли. Территория пос. Крылатовский была подтоплена, а процессы сдвижения в районе шахты Северная Вентиляционная вызвали образование провала глубиной 40 м. Величина воронки составила 80×300 м, в результате образовался водоем длиной около 200 м и шириной от 30 до 50 м.

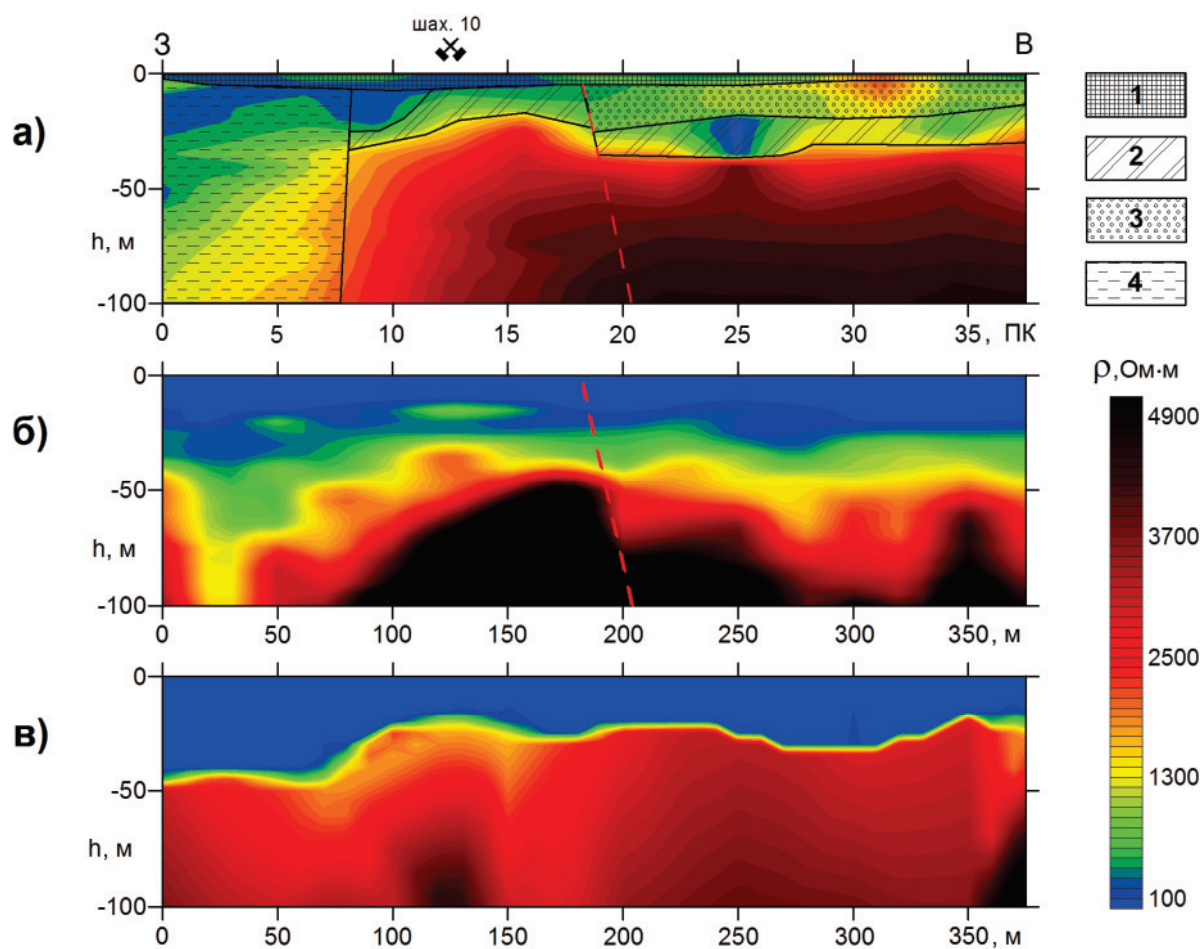


Рис. 1. Результаты электромагнитных зондирований на Крылатовском руднике: а) геоэлектрический разрез ВЭЗ; б) трансформированный разрез АМТЗ; в) результат инверсии радиокип СДВР. Условные обозначения: 1) насыпные грунты; 2) низкоомная кора выветривания; 3) высокоомная кора выветривания; 4) обводненная зона. Красным пунктиром показано тектоническое нарушение, значком обозначено положение шахты 10

Fig. 1. Results of electromagnetic soundings at the Krylatovskiy mine: a) geoelectric section of Vertical Electrical Sounding (VES); b) transformed section of audiomagnetotelluric (AMT) sounding; c) VLF-R inversion results. Legend: 1) bulk soils; 2) low resistance weathering crust; 3) high resistance weathering crust; 4) flooded area. The red dotted line shows tectonic fracture, the icon indicates the position of the mine 10

Геолого-геофизические исследования, включающие несколько методов электромагнитных зондирований, проводились в центральной части шахтного поля, приблизительно в 200 м южнее провала, поблизости от ликвидированной шахты 10. Цель работ заключалась в оценке опасности образования новых просадок поверхности. К задачам электроразведочных методов относилось определение общей мощности рыхлых отложений и степени обводненности горных пород.

По результатам вертикальных электрических зондирований верхняя часть разреза (ВЧР) состоит из 4–5 геоэлектрических слоев. Мощность слоев невыдержанная, также наблюдаются резкие изменения удельных электрических сопротивлений (УЭС) в пределах одного слоя. Сложное строение разреза подтверждается и аудиоманнитотеллурическими зондированиями (АМТЗ) (рис. 1).

По данным ВЭЗ коренные породы в основании разреза характеризуются сопротивлениями 1500–2000 Ом·м и выше. Перекрывающая их кора выветривания (2), мощностью 15–20 м, имеет УЭС в пределах 50–200 Ом·м. Следующий выделяемый слой (3) наблюдается только к востоку от ПК20, он имеет мощность 10–15 м и отличается повышенным сопротивлением ( $\rho=500\text{--}800$  Ом·м). В западной части профиля присутствует мощная зона (4) пониженных сопротивлений ( $\rho=100$  Ом·м), связанная с дезинтеграцией и обводнением пород в районе подземных выработок. Верх разреза до 5 м (1) характеризуется сильным разбросом УЭС от 18 до 1500 Ом·м, в отдельных местах с переслаиванием разнородного материала, что соответствует техногенным насыпным грунтам. Результаты АМТЗ неплохо согласуются с вертикальными электрическими зондированиями. Особенно хорошо выделяется зона шахтной подработки горизонта 71 м на ПК2–ПК7 и тектоническое нарушение в районе ПК20 (рис. 1, б). Некоторое несоответствие УЭС, полученных двумя методами, связано с разными особенностями протекания гальванических (ВЭЗ) и вихревых (АМТЗ) токов. Двухслойный разрез, построенный по данным радиокип СДВР, не может отобразить всех особенностей геоэлектрического строения, но позволяет определить основную границу между коренными породами и рыхлыми отложениями. Так, уверенно выделяется поднятие вблизи шахты 10, характерное для всех геоэлектрических разрезов. Участок подземных горных работ в начале профиля отмечился на разрезе радиокип в виде резкого увеличения мощности рыхлых образований (рис. 1, в). Результаты всех электроразведочных методов указывают на потенциальную опасность дальнейшей просадки поверхности земли в районе затопленных подземных выработок (ПК0–ПК7).

#### Кунгурский профиль

Участок опытно-методических работ находится в Дегтярском рудном районе, в километре к югу от Кунгурского никель-кобальтового месторожде-

ния. Контрольный профиль длиной 600 м расположен в пределах Тагильского прогиба со сложным комплексом пород приконтактной зоны Серовско-Маукского разлома. К разлому приурочен пункт медной минерализации вблизи профиля (№ 1439) и Кунгурковское медно-цинковое проявление в 1,5 км к юго-западу. В начале профиля (ПК0–ПК20) в основании разреза залегают мраморизованные известняки, за которыми следуют серпентиниты (ПК20–ПК35). В конце профиля (ПК35–ПК60) распространены вулканогенные породы, состоящие из порфиритов, кварцевых альбитофиров и их туфов. Геофизическими исследованиями выяснено, что горные породы обладают разными электрофизическими свойствами с характерной широтной зональностью изменения электрического сопротивления и крутым восточным падением границ (рис. 2).

По результатам электромагнитных зондирований удельные электрические сопротивления известняков имеют довольно высокие значения ( $\rho>2000$  Ом·м). Они обладают развитой низкоомной корой выветривания ( $\rho=30\text{--}50$  Ом·м), что может свидетельствовать о значительном содержании в ее составе глинистой компоненты. Серпентиниты и порфириты характеризуются близкими значениями УЭС: 800–1300 Ом·м по данным ВЭЗ и 1300–2500 Ом·м – по радиокип. Кора выветривания серпентинитов отличается крайней невыдержанностью, как по мощности (от 10 до 25 м), так и по УЭС (от десятков до сотен Ом·м). В ней отмечается присутствие локальных высокоомных объектов ( $\rho>1000$  Ом·м), которые могут представлять собой останцы скальных пород. Над вулканогенными породами мощность осадков увеличивается до 35 м, удельные сопротивления составляют 400–600 Ом·м по ВЭЗ и 200–300 Ом·м – по данным радиокип. Поверхностный слой от 2 до 5 м имеет дресвяно-щебенистый состав ( $\rho=140\text{--}290$  Ом·м), а в начале профиля (ПК0–ПК16) – с прослойкой глины ( $\rho=10\text{--}16$  Ом·м). Вертикальные электрические зондирования позволяют довольно детально расчленить геологический разрез по электрическим свойствам. Радиокип в основном позволяет выделить характерные особенности коренных пород, таких как рельеф поверхности и величины сопротивлений. Что касается рыхлых отложений, то здесь возможности радиокип ограничены из-за использования упрощенной (двухслойной) физико-геологической модели. В целом геоэлектрические разрезы хорошо согласуются между собой и соответствуют реальной геологической обстановке.

#### Волчихинский профиль

Участок работ расположен в зоне полимиктового меланжа Серовско-Маукского разлома, разделяющего вулканогенные породы Тагильской и Восточно-Уральской мегазон. Профиль начинается в долине р. Ельчевка, текущей по ослабленной зоне разлома, и идет на восток вкострости уральских структур, в сторону Волчихинского водохранили-

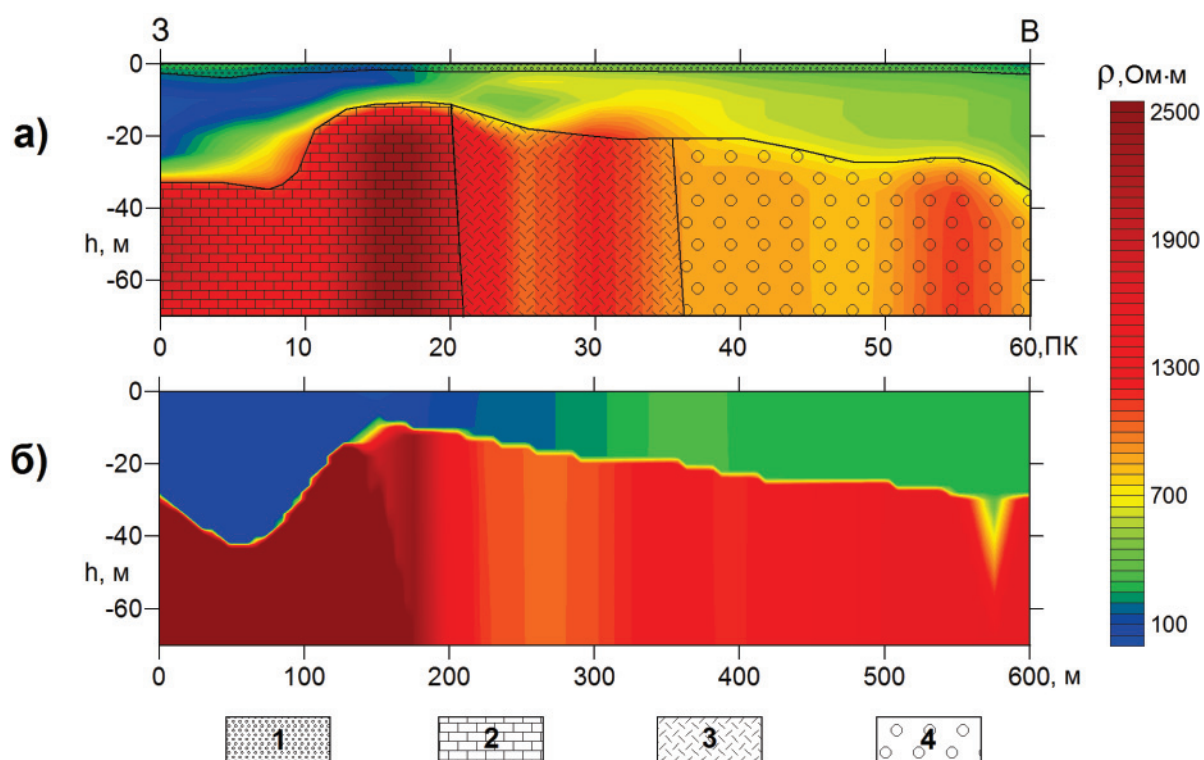


Рис. 2. Результаты электромагнитных зондирований на Кунгурском профиле: а) геоэлектрический разрез ВЭЗ; б) результат инверсии радиокип СДВР. Условные обозначения: 1) дресвяно-щебенистый грунт; 2) известняки; 3) серпентиниты; 4) порфириды и туфы

Fig. 2. Results of electromagnetic soundings on the Kungur profile: а) geoelectric section of VES; б) VLF-R inversion results. Legend: 1) fine-gravelly soil; 2) limestone; 3) serpentinites; 4) porphyrites and tuffs

ща. Основная часть профиля (ПК15–ПК50) сложена базальтами и туфопесчаниками дегтярской свиты, вмещающими колчеданное медно-цинковое и полиметаллическое оруденение. На прилегающей территории обнаружен целый ряд старых горных выработок, пройденных в меридиональном направлении. К зоне меланжа также тяготеет силикатно-никелевое оруденение, связанное с серпентинитами Серовско-Маукского пояса, контактирующими с мраморизованными известняками. Данный тип оруденения локализуется в карстовых полостях верхней части карбонатной толщи. В нескольких километрах к северу расположено Петровское никель-кобальтовое малое месторождение, на юге известно три рудопроявления контактово-карстового типа [25].

На Волчихинском профиле были проведены электроразведочные работы методами АМТЗ, радиокип СДРВ и ДИЗ (дистанционные индукционные зондирования). Малоглубинные индукционные зондирования показали, что кора выветривания дегтярской свиты составляет около 10 м, что подтверждается результатами других методов (рис. 3).

Начало профиля характеризуется низкими значениями сопротивлений за счет увеличенной мощности рыхлых отложений до 50 м и повышенной трещиноватости коренных пород в зоне мелан-

жа. Резкий перепад рельефа основания разреза в районе ПК10–ПК15 соответствует восточной границе Серовско-Маукского разлома. Смена геологической обстановки отображается всеми электрометрическими методами. На разрезах АМТЗ и радиокип СДРВ также хорошо выделяются опережающие тектонические нарушения (ПК36 и ПК42) по характерному аномальному снижению УЭС. Сравнивая полученные разрезы можно констатировать, что результат инверсии радиокип имеет все структурные особенности, присущие АМТЗ, но обладает большей контрастностью в отношении границы коренных пород. Учитывая приуроченность сульфидной минерализации к зонам тектонических нарушений (по старым выработкам), можно спрогнозировать рудную перспективность участка в интервале ПК33–ПК45.

#### Чусовское месторождение

Чусовское медно-колчеданное месторождение расположено в Полевском районе Свердловской области. Прилегающая территория охватывает зону сочленения южной части Тагильского прогиба с западной границей Восточно-Уральского поднятия. Граница между указанными структурами первого порядка проходит по Дегтярскому сдвигу. Чусовское месторождение располагается в пределах Полевской мегасинклинали и приурочено к

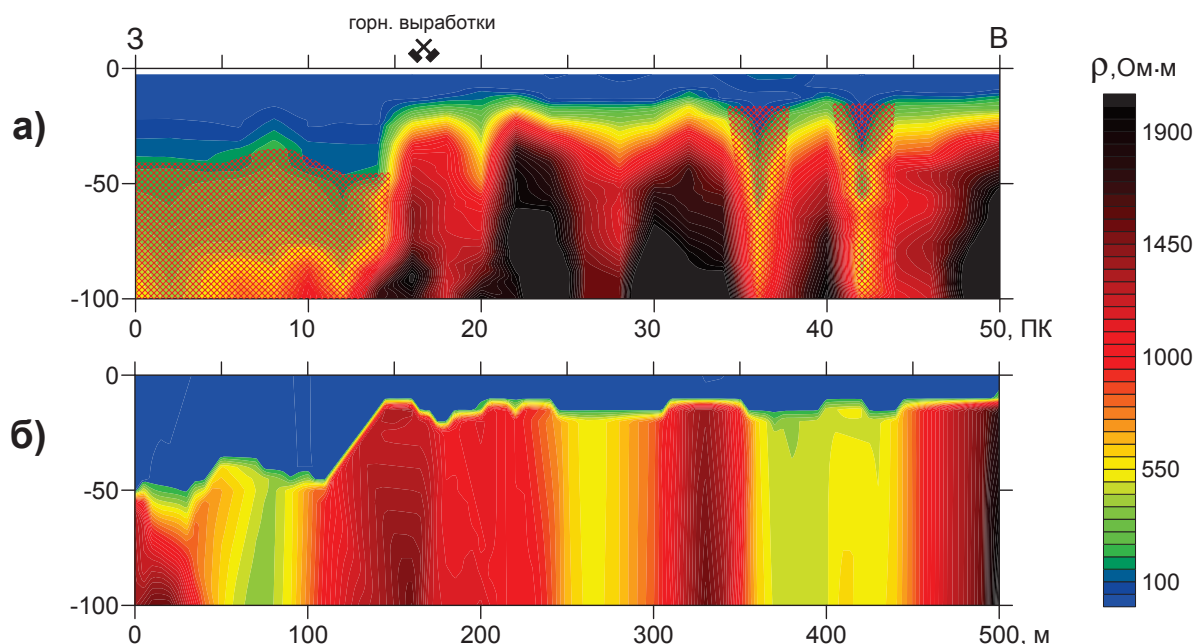


Рис. 3. Результаты электромагнитных зондирований на Волчихинском профиле: а) трансформированный разрез АМТЗ; б) результат инверсии радиокип СДРВ. Штриховкой выделены зоны тектонических нарушений

Fig. 3. Results of electromagnetic soundings on the Volchikhinsky profile: a) transformed section of AMT; b) VLF-R inversion results. Hatching highlighted zones of tectonic fractures

меридионально вытянутой Чусовско-Поварнинской зоне метаморфических сланцев, залегающих среди зеленокаменных пород (альбитофиры, порфиroidы, серпентиниты). Месторождение открыто в ходе разведочного бурения и представлено системой жильобразных тел, сложенных густыми вкрапленниками с линзами и прожилками сплошных колчеданов, залегающих согласно сланцеватости метаморфических сланцев. Рудоносная зона не имеет выхода на поверхность («слепое» тело) и располагается на глубине от 30 до 300 м. Основное рудное тело мощностью до 10 м имеет меридиональное простирание и восточное падение под углом 60–70°.

Из-за небольшого размера и значительной глубины залегания Чусовское месторождение не разрабатывалось, однако на нем проведен большой объем разведочного бурения и каротажа скважин. По электрокаротажным данным удельные электрические сопротивления горных пород меняются в широких пределах. Зеленокаменные породы обладают самым высоким сопротивлением (2000–10000 Ом·м). Метаморфические сланцы характеризуются значениями от 300 до 1500 Ом·м, снижающимися до 50–300 Ом·м, при обогащении сульфидами. Низкими УЭС выделяются поверхностные отложения (10–20 Ом·м), рудные зоны (10–100 Ом·м) и сплошные колчеданы (менее 1 Ом·м) [26]. В течение длительного времени месторождение служит в качестве контрольного полигона для опытно-методических и научных работ. На нем испытано множество геофизических методов исследований, в том числе несколько

видов электромагнитных зондирований. Наиболее детально представлен разрез аудиомэгнитотеллурических зондирований, с которым сопоставлен результат интерпретации радиокип СДРВ (рис. 4).

Проведенные исследования свидетельствуют, что толщина рыхлых отложений в западной части профиля не превышает 10 м и снижается в восточном направлении до полуметра. Однако над рудным телом наблюдается резкое увеличение мощности осадков до 15–20 м. По результатам обоих методов, УЭС коренных пород отличаются стабильно высокими значениями (2000–5000 Ом·м и выше), только в околорудной зоне сопротивления снижаются до 700–1500 Ом·м. Ранее на прилегающей территории были выполнены поисково-разведочные работы на колчеданное оруденение с привлечением геофизики, которые не привели к положительному результату. Причиной может являться недостаточная детальность съемки. Геофизические работы ставились исходя из результатов каротажа, в предположении о высокой контрастности руд и широкой зоне сульфидной минерализации. Наземные исследования опровергают это предположение. Ширина околорудных изменений, уверенно выделяемых электромагнитными зондированиями, составляет всего 20 м. Следовательно, шаг съемки для обнаружения рудного объекта должен составлять не более 6 м. Традиционные электроразведочные методы малопродуктивны при данном шаге наблюдений, следовательно, слишком затратные. Метод радиокип более эффективен, поскольку позволяет проводить

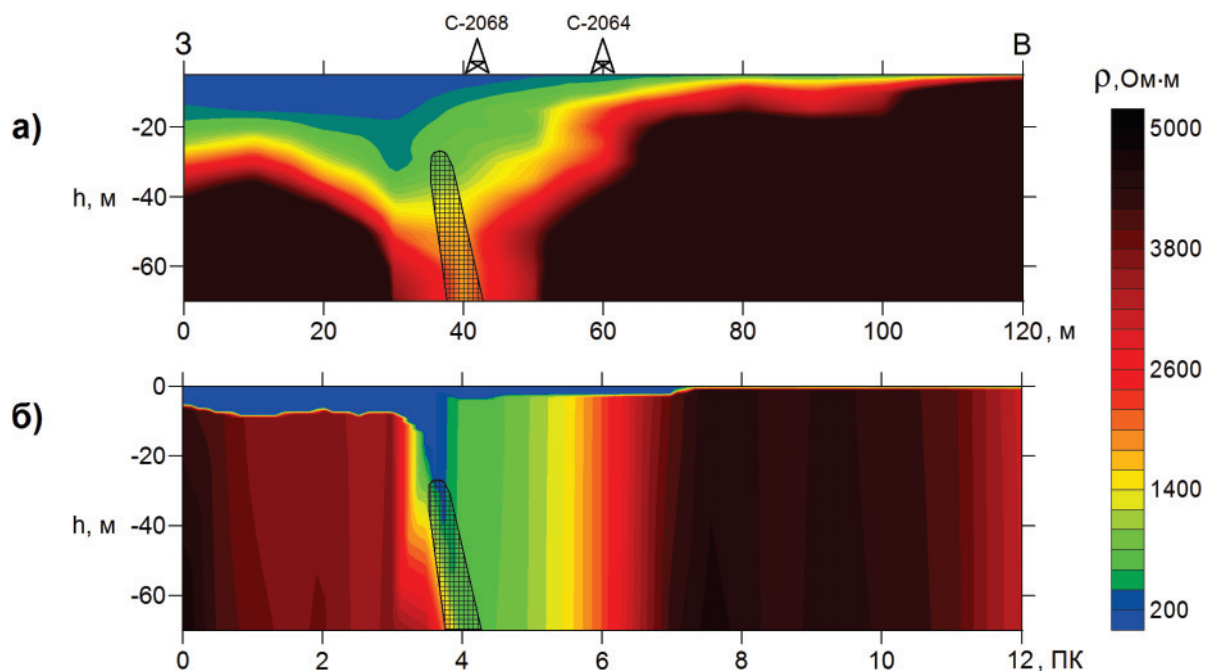


Рис. 4. Результаты электромагнитных зондирований на Чусовском медно-колчеданном месторождении: а) трансформированный разрез АМТЗ; б) результат инверсии радиокип СДВР

Fig. 4. Results of electromagnetic soundings at the Chusovskoye copper-pyrite deposit: a) transformed section of AMT; b) VLF-R inversion results

быструю съемку за счет безгенераторной технологии. Сравнительные результаты указывают на принципиальную возможность обнаружения «слепых» рудных тел, залегающих на большой глубине, с помощью относительно малоглубинного, но производительного метода радиокип СДРВ. Ряд исследователей считает, что перспективность Дегтярско-Полевского рудного района остается высокой [27], и детальная доразведка может привести к обнаружению новых месторождений.

#### Заключение

Проведенные исследования показали хорошую сопоставимость результатов инверсии радиокип СДВР с геоэлектрическими разрезами, полученными другими методами электромагнитных зон-

дирований. Радиокип не может отобразить всех особенностей строения верхней части разреза, но позволяет выделить характерные черты коренных пород и определить основную границу между рыхлыми отложениями и основанием разреза. Полученные результаты указывают на принципиальную возможность обнаружения глубокозалегающих рудных объектов с помощью метода радиокип СДРВ. Метод отличается хорошей производительностью, поэтому можно добиться высокой детальности наблюдений при небольших затратах. Геоэлектрические разрезы радиокип могут использоваться для оперативной оценки общей мощности коры выветривания и выбора точек зондирования другими электромагнитными методами для уточнения геологической обстановки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тархов А.Г. Основы геофизической разведки методом радиокип. – М.: Госгеолтехиздат, 1961. – 213 с.
2. Гордеев С.Г., Седельников Э.С., Тархов А.Г. Электроразведка методом радиокип. – М.: Недра, 1981. – 132 с.
3. Ogilvy R.D. An appraisal of the VLF ground resistivity technique as an aid to mineral exploration // Mineral Reconnaissance Programme Rep. Inst. Geol. Sci. – 1980. – № 36. – P. 1–20.
4. McNeill J.D., Labson V.F. Geological mapping using VLF radio fields // Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. – 1991. – V. 2. – P. 521–640.
5. Paterson N.R., Ronka V. Five years of surveying with very low frequency – electromagnetics method // Geoexpl. – 1971. – № 9. – P. 7–26.
6. Fraser D.C. Contouring of VLF-EM data // Geophysics. – 1969. – № 34. – P. 958–967.
7. Karous M., Hjelt S.E. Linear filtering of VLF dip-angle measurements // Geophysical Prospecting. – 1983. – № 31. – P. 782–794.
8. Jeng Y., Lin M.-J., Chen C.-S., Wang Y.-H. Noise reduction and data recovery for a VLF-EM survey using a nonlinear decomposition method // Geophysics. – 2007. – № 72. – P. F223–F235.
9. Lin M.-J., Jeng Y. Application of the VLF-EM method with EEMD to the study of a mud volcano in southern Taiwan // Geomorphology. – 2010. – № 119. – P. 97–110.
10. Давыдов В.А., Давыдов А.В. Очистка геофизических данных от шумов с использованием преобразования Гильберта-Хуанга // Актуальные инновационные исследования: наука и практика. – 2010. – № 1. – С. 1–26.

11. Chouteau M., Zhang P., Chapellier D. Computation of apparent resistivity profiles from VLF-EM data using linear filtering // *Geophys. Prosp.* – 1996. – № 44. – P. 215–232.
12. Gharibi M., Pedersen L.B. Transformation of VLF data into apparent resistivities and phases // *Geophysics.* – 1999. – № 64. – P. 1393–1402.
13. VLF-MT Survey around Nakadake crater at Aso Volcano / A. Harja, W. Srigutomo, Y. Tanaka, T. Kagiya, D. Sutarno // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* – 2016. – V. 29. – № 1. – P. 1–8.
14. Subsurface Structure Mapping Using Geophysical Data in Candi Umbul-Telomoyo, Magelang, Central Java, Indonesia / A.P. Afianti, E. Prastyani, P.D. Maghfira, S.W. Niasari // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2018. – V. 1011. – № 1. – P. 012027 (1–5).
15. Prastyani E., Niasari S.W. Interpretation of VLF-EM & VLF-R data using tipper and impedance analyses: A case study from Candi Umbul-Telomoyo, Magelang, Indonesia // *1<sup>st</sup> International Geo-Electromagnetic Workshop (GEO-EM 2017). AIP Conference Proceedings.* – West Java, Indonesia. – 2017. – V. 1861. – № 1. – P. 030017 (1–4).
16. Давыдов В.А. Универсальный полевой геофизический приемник ОМАР-2 // *Приборы и техника эксперимента.* – 2016. – № 6. – С. 127–128.
17. Давыдов В.А. Электроразведка методом радиоклип в сверхдлинноволновой модификации с использованием радиостанций системы дальней навигации РСДН-20 («Альфа») // *Инженерные изыскания.* – 2014. – № 2. – С. 65–70.
18. Cagniard L. Basic theory of the magnetotelluric method in geophysical prospecting // *Geophysics.* – 1953. – № 18. – P. 605–635.
19. Pirttijärvi M. 2LAYINV – Laterally constrained two-layer inversion of VLF-R measurements. User's guide. – Oulu: University of Oulu, 2006. – 12 p.
20. Давыдов В.А. Интерпретация импедансных данных радиоклип сверхдлинноволновых радиостанций с построением двухслойных геоэлектрических разрезов // *Известия вузов. Горный журнал.* – 2018. – № 1. – С. 99–106.
21. Инструкция по электроразведке / под ред. Г.С. Франтова. – Л.: Недра, 1984. – 352 с.
22. Давыдов В.А. Способ преобразования аудиоманнителлурических данных с учетом априорной информации // *Геофизические исследования.* – 2016. – Т. 17. – № 4. – С. 57–66.
23. Золотооруденение Екатеринбургского геологического полигона / В.Н. Сазонов, В.Н. Огородников, Ю.А. Поленов и др. – Екатеринбург: УГГА, 1997. – 226 с.
24. Зонирование природно-техногенных гидрогеологических систем (на примере Крылатовского рудника) / С.Н. Елохина, В.А. Арзамасцев, С.Э. Борич, Е.М. Сотова, В.А. Щапов // *Известия вузов. Геология и разведка.* – 2010. – № 1. – С. 57–66.
25. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Издание второе. Серия Среднеуральская. Лист О-41-XXV. Объяснительная записка / Р.Д. Калугина, В.Ф. Копанев, Е.В. Стороженко и др. – М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2017. – 156 с.
26. Сравнительная характеристика методов скважинной электроразведки (по материалам Чусовского колчеданного месторождения) / П.Ф. Родионов, С.А. Жданов, А.А. Кожевников, И.И. Кононенко // *Теория и практика электрометрии.* – Свердловск: РИСО УНЦ АН СССР, 1972. – С. 164–176.
27. Жданов С.А., Пыжьянов Ю.Б. Результаты работ по обобщению геолого-геофизических материалов в Дегтярско-Полевском районе // *Леса России и хозяйство в них.* – 2011. – № 1 (38). – С. 19–26.

Поступила 23.11.2018 г.

#### Информация об авторах

**Давыдов В.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической геофизики Института геофизики им. Ю.П. Булашевича Уральского отделения РАН.

UDC 550.837.74

## OPPORTUNITIES OF VLF METHOD WHEN STUDYING THE TOP SECTION IN ORE AREAS

Vadim A. Davydov,  
davyde@yandex.ru

Bulashevich Geophysics Institute, Ural Branch of RAS.  
100, Amundsen street, Yekaterinburg, 620016, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the economic interest in using simple, efficient and high-performance geophysical technologies for prospecting and exploration of ore deposits.

**The main aim** of the research is to evaluate the information content of geoelectrical sections, built on the impedance data of the Very Low Frequency (VLF) method, when studying the weathering crust and the bedrock in various geological conditions.

**Objects** of the research are located in the Degtyarsko-Polevsky ore region of the Middle Urals, in the contact zone of the Serovsko-Mauksky Fault, separating the rock complexes of the Tagil trough and the East Ural uplift. Geophysical profiles were located on the territory of the Krylatovsky gold-quartz deposit, the Chusovskoe copper-pyrite deposit, the Kungursky and Volchikhinsky areas.

**Methods.** Field measurements were carried out with a OMAR-2m wideband receiver with a creeping line and an inductive sensor of an alternating magnetic field. Observations of the orthogonal components of the very low frequency radio station signal field were made. As a comparison, we used the results of audio magnetotelluric and vertical electrical soundings, as well as information on the geological study of the territory. Quantitative processing of electrical data was carried out using software developed in various scientific institutions.

**Results.** Studies have shown good comparability of the results of very low frequency inversion with the geoelectric sections obtained by other methods of electromagnetic sounding. A very low frequency method cannot display all the structural features of the upper part of the section, but makes it possible to single out the characteristic features of bedrock and to determine the main boundary between the loose sediments and the base of the section. The obtained results indicate that it is possible in principle to detect deep-laying ore objects using the very low frequency method. The method has a good performance, so you can achieve high detail observations at low cost. The geo-electric sections of the very low frequency can be used to quickly assess the total thickness of the weathering crust and select sounding points by other electromagnetic methods to clarify the geological situation.

### Key words:

Very Low Frequency method, components of electromagnetic field, impedance, geoelectrical section, ore deposit.

### REFERENCES

1. Tarhov A.G. *Osnovy geofizicheskoy razvedki metodom radiokip* [Fundamentals of geophysical intelligence by VLF method]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1961. 213 p.
2. Gordeev S.G., Sedelnikov E.S., Tarkhov A.G. *Elektrozvedka metodom radiokip* [Electrical survey by VLF method]. Moscow, Nedra Publ., 1981. 132 p.
3. Ogilvy R.D. An appraisal of the VLF ground resistivity technique as an aid to mineral exploration. *Mineral Reconnaissance Programme Rep. Inst. Geol. Sci.*, 1980, no. 36, pp. 1–20.
4. McNeill J.D., Labson V.F. Geological mapping using VLF radio fields. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, 1991, vol. 2, pp. 521–640.
5. Paterson N.R., Ronka V. Five years of surveying with very low frequency – electromagnetics method. *Geoexpl.*, 1971, no. 9, pp. 7–26.
6. Fraser D.C. Contouring of VLF-EM data. *Geophysics*, 1969, no. 34, pp. 958–967.
7. Karous M., Hjelt S.E. Linear filtering of VLF dip-angle measurements. *Geophysical Prospecting*, 1983, no. 31, pp. 782–794.
8. Jeng Y., Lin M.-J., Chen C.-S., Wang Y.-H. Noise reduction and data recovery for a VLF-EM survey using a nonlinear decomposition method. *Geophysics*, 2007, no. 72, pp. F223–F235.
9. Lin M.-J., Jeng Y. Application of the VLF-EM method with EEMD to the study of a mud volcano in southern Taiwan. *Geomorphology*, 2010, no. 119, pp. 97–110.
10. Davydov V.A., Davydov A.V. Ochistka geofizicheskikh dannyykh ot shumov s ispolzovaniem preobrazovaniya Gilberta–Huanga [Clearing geophysical data from noise using the Hilbert–Huang transform]. *Aktualnye innovatsionnye issledovaniya: nauka i praktika*, 2010, no. 1, pp. 1–26.
11. Chouteau M., Zhang P., Chapellier D. Computation of apparent resistivity profiles from VLF-EM data using linear filtering. *Geophys. Prosp.*, 1996, no. 44, pp. 215–232.
12. Gharibi M., Pedersen L.B. Transformation of VLF data into apparent resistivities and phases. *Geophysics*, 1999, no. 64, pp. 1393–1402.
13. Harja A., Srigutomo W., Tanaka Y., Kagiya T., Sutarno D. VLF-MT Survey around Nakadake crater at Aso Volcano. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 29, no. 1, pp. 1–8.
14. Affanti A.P., Prastyani E., Maghira P.D., Niasari S.W. Subsurface Structure Mapping Using Geophysical Data in Candi Umbul-Telomoyo, Magelang, Central Java, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1011, no. 1, pp. 012027 (1–5).
15. Prastyani E., Niasari S.W. Interpretation of VLF-EM & VLF-R data using tipper and impedance analyses: A case study from Candi Umbul-Telomoyo, Magelang, Indonesia. *1st International Geo-Electromagnetic Workshop (GEO-EM 2017). AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1861, no. 1, pp. 030017 (1–4).
16. Davydov V.A. Universalny polevoy geofizicheskiy priemnik OMAR-2 [Universal field geophysical receiver OMAR-2]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2016, no. 6, pp. 127–128.
17. Davydov V.A. Elektrozvedka metodom radiokip v sverkhdlin-novolnovoy modifikatsii s ispolzovaniem radiostantsiy sistemy dalney navigatsii RSDN-20 («Alfa») [Electrical survey by VLF method using radio stations of the RSDN-20 long-distance navigation system («Alpha»)]. *Inzhenernye izyskaniya*, 2014, no. 2, pp. 65–70.
18. Cagniard L. Basic theory of the magnetotelluric method in geophysical prospecting. *Geophysics*, 1953, no. 18, pp. 605–635.
19. Pirttijärvi M. 2LAYINV – Laterally constrained two-layer inversion of VLF-R measurements. User's guide. Oulu, University of Oulu, Division of Geophysics, 2006. 12 p.
20. Davydov V.A. Interpretation of the impedance data of the VLF radio stations with the construction of two-layer geoelectric sections. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*, 2018, no. 1, pp. 99–106. In Rus.

21. *Instruktsiya po elektrorazvedke* [Electrical Survey Instructions]. Ed. by G.S. Frantov. Leningrad, Nedra Publ., 1984. 352 p.
22. Davydov V.A. Method for converting audio magnetotelluric data with regard to a priori information. *Geofizicheskie issledovaniya*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 57–66. In Rus.
23. Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A. *Zolotoorudenie Ekaterinburgskogo geologicheskogo poligona* [Gold mining of the Yekaterinburg geological test site]. Ekaterinburg, UGGA Publ., 1997. 226 p.
24. Elokhina S.N., Arzamastsev V.A., Borich S.E., Sotova E.M., Shchapov V.A. Zonirovanie prirodno-tekhnogennykh gidrogeologicheskikh sistem (na primere Krylatovskogo rudnika) [Zoning of natural and man-made hydrogeological systems (for example, Krylatovsky mine)]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 2010, no. 1, pp. 57–66.
25. Kalugina R.D., Kopanev V.F., Storozhenko E.V. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:200000. Seriya Sredneuralskaya* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200000. Series Sredne-Ural]. Moscow, Moskovskiy filial FGBU «VSEGEI» Publ., 2017. 156 p.
26. Rodionov P.F., Zhdanov S. A., Kozhevnikov A.A., Kononenko I.I. Sravnitel'naya kharakteristika metodov skvazhinnoy elektrorazvedki (po materialam Chusovskogo kolchedannogo mestorozhdeniya) [Comparative characteristics of downhole electrical survey methods (based on materials from the Chusovskoy pyrite field)]. *Teoriya i praktika elektrometrii* [Theory and practice of electrometry]. Sverdlovsk, RISO UNC AN SSSR, 1972. pp. 164–176.
27. Zhdanov S.A., Pyzhyanov Yu.B. The results of the generalization of geological and geophysical materials in the Degtyarsko-Polevsky district. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nihh*, 2011, no. 1 (38), pp. 19–26.

Received: 23 November 2018.

#### Information about the authors

**Vadim A. Davydov**, Cand. Sc., senior researcher, Bulashevich Geophysics Institute, Ural Branch of RAS.

УДК 550.83+552.5+553.98

## ИНТЕНСИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ НАЛОЖЕННОГО ЭПИГЕНЕЗА КАК ИНДИКАТОРЫ НЕФТЕНАСЫЩЕННОСТИ ПЕСЧАНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Мельник Игорь Анатольевич,  
migranis@mail.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования обусловлена возможностью выявлять пропущенные (низкоомные) продуктивные залежи в песчаных интервалах по материалам старого фонда геофизических исследований скважин (ГИС) и прежде всего там, где отсутствуют данные по керну.

**Целью** исследования является иллюстрация применения такого параметра, как интенсивность наложено-эпигенетических процессов в песчаниках в качестве индикатора нефтенасыщенности коллекторов на различных территориях Западной Сибири.

**Объекты:** верхне-среднеюрские песчаные отложения Томской области и ачимовская толща нижнемеловых песчаных отложений месторождения Самотлор.

В работе использована авторская технология статистической интерпретации данных ГИС на предмет выявления интенсивностей наложено-эпигенетических процессов каолинизации, карбонатизации, пиритизации, пелитизации и пропущенных низкоомных УВ-насыщенных коллекторов.

**Результаты.** Подтверждено, что параметры интенсивностей наложено-эпигенетических процессов каолинизации и пиритизации для юрских и меловых песчаных отложений различных территорий Западной Сибири могут служить индикаторами нефтенасыщенности коллекторов. Подобраны граничные значения индикаторов для Томской области и Самотлора. Парагенез наложено-эпигенетических процессов пиритизации и каолинизации в песчаных интервалах указывает на их УВ насыщение. Эмпирические исследования показали, что коэффициент успешности применения данных индикаторов соответствует ~75–80 % при их определении инновационным методом статистической интерпретации ГИС для выявления пропущенных УВ залежей.

**Вывод.** Использование технологии статистической интерпретации данных ГИС с высокой степенью достоверности позволяет выявлять пропущенные нефтенасыщенные низкоомные интервалы на базе старого фонда материалов ГИС, а также решать литологические, петрофизические и геологические задачи (обусловленные глубинной флюидомиграцией) при поиске и разведке залежей нефти и газа.

### Ключевые слова:

Наложено-эпигенетический процесс, вторичная каолинизация, вторичная пиритизация, низкоомный коллектор, углеводороды, удельное электрическое сопротивление, геофизические исследования скважин.

### Введение

Согласно определению, данному Б.А. Лебедевым, процесс наложенного эпигенеза – это геохимические и литолого-петрофизические изменения пород, вызываемые поступлением флюидов из внешних источников [1]. Эти изменения реализуются в результате поступления глубинных флюидов в коллектор по субвертикальным проницаемым зонам.

При изучении процессов наложенного эпигенеза в мезозойских отложениях Западной Сибири разные авторы сумели выделить группы аутигенных минералов в песчаных коллекторах в качестве индикаторов вертикальной флюидомиграции и нефтенасыщенности пород [2–9]. Например, формирования в песчаной породе вторичных карбонатов с кремнеземом, пелитизация и выщелачивание пород верхних интервалов исследуемого пласта определяют зону водонефтяного контакта [4–6]. Уменьшение интенсивности наложено-эпигенетических процессов (каолинизации, карбонатизации и др.) в нефтенасыщенных коллекторах (вследствие «консервирующих» свойств углеводородов (УВ)) относительно интенсивности этих же процессов в водонасыщенных интервалах позволяет выделять перспективные пласты [8]. В зонах стабилизации водонефтяного контакта, при заполнении коллекторов УВ, зарубежные авторы выде-

ляют подзоны выщелачивания, в которых происходят интенсивные растворения таких групп минералов, как полевые шпаты, кварц, карбонаты [10–18]. Как правило, все лито-геохимические аномалии локальны и территориально тяготеют к проницаемым зонам, глубинным разломам растяжения, формирующимся в результате тектонических движений земной коры [2–5, 7].

Лито-геохимические аномалии далеко не всегда генетически связаны с углеводородами. Поступления глубинных, химически агрессивных гидротерм могут привести к таким же результатам преобразования пород, что и при мигрирующей смеси УВ с органическими кислотами. Очевидно, что универсальным индикатором нефтенасыщенности различных территорий и горизонтов могут быть не столько группы вторичных минералов, а *интенсивности* преобразования аллотигенных минералов в данные группы. Причем аллотигенные минералы, содержащиеся в породах сравнительных залежей, должны быть сформированы в похожих фациальных обстановках осадконакопления.

Целью данной работы является иллюстрация применения такого параметра как интенсивность наложено-эпигенетических процессов в песчаниках в качестве индикатора нефтенасыщенности коллекторов на различных территориях Западной Сибири. Рассмотрены геохимические процессы ка-

олинитизации и пиритизации в песчаных породах нефтегазовых залежей Томской области и Самотлора. Проведен сравнительный анализ вероятностной связи данных процессов с УВ, возможности использования вычисляемых статистических параметров для поиска и разведки перспективных залежей разработанной технологией интерпретации материалов геофизических исследований скважин (ГИС).

В основном объектами исследований являются верхне-среднеюрские песчаные отложения Томской области и ачимовская толща нижнемеловых песчаных отложений месторождения Самотлор. Причем корректность и валидность рассматриваемой инновационной технологии определения параметров статистических интенсивностей каолинитизации и пиритизации по данным ГИС в песчаниках исследована и подтверждена в ранних работах [19–22]. Например, доказано, что метод статистической интерпретации данных ГИС при вычислении интенсивности каолинитизации выявляет интервалы, содержащие только вторичные, аутигенные каолиниты.

Актуальность этой работы обусловлена появившейся возможностью выявлять пропущенные (низкоомные) продуктивные залежи в песчаных интервалах по материалам старого фонда ГИС и прежде всего там, где отсутствуют данные по керну. Низкоомные интервалы, как правило, возникают в результате образования поверхностной электрической цепи при интенсивной пиритизации и появления двойного электрического слоя в глинистых фракциях песчаных пород [23–25]. При традиционной интерпретации ГИС эти интервалы трактуются как водонасыщенные и пропускаются.

#### Обоснование необходимости использования новых методов интерпретации ГИС

Если эпигенетический процесс является причиной одновременного изменения двух (и более) исследуемых характеристик породы, то статистические параметры корреляционных зависимостей между выборками данных характеристик будут отражать влияния интенсивностей процессов на породу [19]. К таким параметрам относят коэффициент аппроксимации ( $R^2$ ) и интервальный параметр ( $Y$ ). Произведение статистических параметров  $i = YR^2$  назовем статистической *интенсивностью вторичных процессов*, выражающее как качественную ( $R^2$ ), так и количественную ( $Y$ ) меры статистических регрессионных связей [19–22].

Вначале рассмотрим, в какой степени успешен традиционный метод интерпретации данных ГИС при поиске перспективных УВ насыщенных песчаных пластов в разведочных и поисковых скважинах Томской области. Для определения коэффициента успешности сделаем следующее допущение – пусть все испытанные песчаные интервалы изначально интерпретировались (стандартным способом) как перспективные нефтенасыщенные пласты.

Всего на таких участках и месторождениях УВ Томской области, как Болтная, Восток, Вертолетная, Киев-Ёганская, Мирная, Пинджинская, Снежная, Лесная, Рыбальная, Крыловская, Ясная и др., в 117 исследуемых скважинах были проведены испытания 269-ти песчаных интервалов мела и юры. Из них только 41 интервал оказался нефтенасыщенным, т. е. интервальный коэффициент успешности будет равен:

$$K_{\text{инт}} = 41/269 = 0,15 \text{ д.ед.}$$

Анализ данных скважин на предмет наличия в них УВ залежей определил коэффициент успешности, равный 0,25, т. е. общий коэффициент успешности соответствует 3,7 %. Естественно, низкая величина этого коэффициента обусловлена не только введенным допущением, но и совокупностью неэффективных стандартных методик в определении места заложения скважин, основанных на выявлении антиклинальных ловушек при концепции органического генезиса УВ. На современном этапе развития геологической мысли перспективный участок с вероятным присутствием УВ залежи связывают не только с ловушкой (антиклинальной и неантиклинальной), но и с близкорасположенным вертикальным каналом миграции глубинных флюидов. Согласно неорганической концепции генезиса нефти, концентрация углеводородов в ловушках фундамента и мезозойских пород происходит вследствие глубинной миграции флюидов по ослабленным зонам нижних слоев литосферы и мантии [4, 26, 27].

Повышение интервального коэффициента успешности обычно связывают с переинтерпретацией материалов ГИС старого фонда на основе нестандартного подхода интерпретации ГИС либо на базе полученных новых данных исследуемой площади, их комплексирования. В результате исследований получают информацию о пропущенных перспективных нефтенасыщенных интервалах.

Из всех высоко-электропроводящих железосодержащих минералов в песчаных породах чаще всего встречается пирит. При незначительной минерализации пластовой воды (менее 35–40 г/л) обратная корреляция между удельным электрическим сопротивлением (УЭС) песчаной породы и относителем содержания железа в большинстве своем обусловлена содержанием пирита. Пириты могут быть как аутигенными, т. е. обусловлены наложено-эпигенетическими процессами, так и аллотигенными, связанными с процессами осадконакопления. Многолетние исследования показали, что в нефтенасыщенных песчаниках интенсивность пиритизации в 95 % случаев *положительно* коррелирует с коэффициентом трещиноватости пород, а при водонасыщенном коллекторе наблюдается *отрицательная* экспоненциальная регрессия [21]. Корреляционная связь интенсивности пиритизации с трещиноватостью пород является косвенным подтверждением причинно-следственной связи флюидодинамики с образованием пиритов, т. е. утверждает их вторичность.

Возможно, что в процессе формирования залежи при фазовом разделении смеси воды и нефти происходит распад гидратной оболочки частиц «микронези» на нефть и временно диссоциированную воду. Временно существующая гидроксильная группа идет на образование гидроксида железа, а избыток свободных ионов водорода приводит к уменьшению pH среды до 4–5. С присутствием сероводорода пиритизация будет проходить одностадийно, совместно с каолинитизацией породы, обуславливая их парагенез (рис. 2) [20–22, 28, 29].

#### Анализ и обобщение результатов интерпретации данных ГИС

Рассмотрим возможности применения технологии статистической интерпретации материалов ГИС старого фонда для повышения эффективности выявления нефтенасыщенных коллекторов в мезозойских отложениях. С этой целью была проведена статистическая интерпретация данных ГИС 20–25 песчаных интервалов в каждой из 117 скважин вышеперечисленных территорий Томской области. Проведено сопоставление величин интенсивностей пиритизации и каолинитизации в 269 испытанных пластах для нефтенасыщенных и водонасыщенных («сухих») интервалов (табл. 1).

Таблица 1. Усредненные результаты статистической интерпретации ГИС для нефте- и водонасыщенных интервалов по Томской области

Table 1. Average results of well logging data interpretation in oil and water saturated intervals in Tomsk region

| Насыщение<br>Saturation | $\langle i_{\text{пир}} \rangle$<br>Pyritisation<br>intensity | $\langle i_{\text{као}} \rangle$<br>Kaolinitization<br>intensity | $I$<br>Total<br>intensity | $Q$<br>Concealed<br>electrical<br>conductivity |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------|
|                         | усл. ед./conv. unit                                           |                                                                  |                           |                                                |
| Нефть (Н)<br>Oil (O)    | 0,13                                                          | 0,20                                                             | 3,9                       | 0,40                                           |
| Вода (В)<br>Water (W)   | 0,11                                                          | 0,16                                                             | 3,0                       | 0,33                                           |
| Н/В (O/W)               | 1,18                                                          | 1,25                                                             | 1,3                       | 1,23                                           |

В табл. 1 даны усредненные интенсивности вторичных процессов пиритизации и каолинитизации для 41 нефтенасыщенных и 228 водонасыщенных испытанных интервалов. В четвертом и пятом столбцах показаны вычисленные статистические параметры. Эмпирическим путем определен параметр интенсивности, суммирующий рассматриваемые интенсивности, несущий наиболее отличительные признаки нефте- и водонасыщенных коллекторов:

$$I = \exp(3(i_{\text{пир}} + i_{\text{као}})). \quad (1)$$

Отрицательная зависимость глинистости с УЭС обусловлена повышенной электрической проводимостью двойного электрического слоя (ДЭС) глинистой фракции. Зная статистические интенсивности рассматриваемых процессов (пиритизации, пелитизации и параметр ДЭС), определяющих поверхностную электрическую проводимость поро-

ды, можно определить параметр *скрытой электрической проводимости* (СЭП) [22]:

$$Q = \sum Y R_i^2. \quad (2)$$

В четвертой строке табл. 1 даны отношения средних вычисляемых статистических параметров для нефтяных и водонасыщенных интервалов. Заметно, что величины всех «нефтяных» вычисляемых параметров на 20–30 % больше «водных». Это является подтверждением связи исследуемых вторичных преобразований породы с углеводородами.

Рассмотрим возможности применения параметров  $I$  и  $Q$  для выявления УВ насыщенных интервалов. Были использованы выборки нефтенасыщенных (41 шт.) и водонасыщенных (75 шт.) интервалов. Построены две гистограммы плотностей распределения параметра интенсивности, вычисляемые по формуле (1) (рис. 1). Анализ рис. 1 позволяет выбрать наиболее перспективные интервалы данного распределения с точки зрения повышенной вероятности выявления УВ насыщенных пластов. Граничные значения данных интервалов следующие:  $I_{\text{д}} = [2,9–3,5]$  и  $I_{\text{уб}} > 7$  усл. ед.

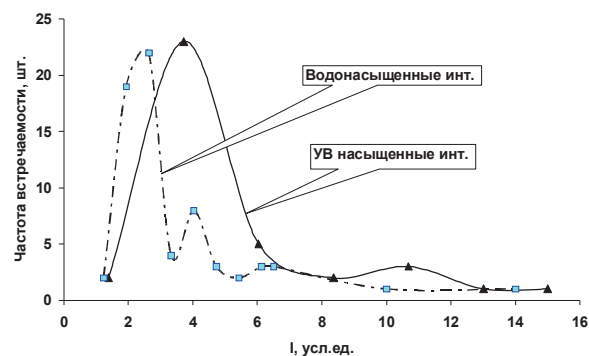


Рис. 1. Гистограммы плотности распределения параметра интенсивности вторичных процессов в водо- и нефтенасыщенных песчаных интервалах мела и юры на месторождениях Томской области

Fig. 1. Density histograms show the intensity of secondary processes in water- and oil saturated sandstone intervals in Jurassic and Cretaceous deposits, Tomsk region

Определив граничные значения параметра  $I$ , был проведен анализ вероятности выявления нефтенасыщенных пластов в зоне границ  $I_{\text{уб}} + I_{\text{д}}$  из 269 интервалов. Из 41 УВ интервала в эту зону попало 13 интервалов при общем количестве 22 (УВ и водонасыщенных), что соответствует вероятности:

$$P_{\text{инт}} = 13/22 = 0,6 \text{ д. ед.}$$

Нас интересуют не просто нефтенасыщенные пласты, а пропущенные при стандартной интерпретации данных ГИС, низкоомные УВ насыщенные коллекторы. Поэтому мы вводим в выборочный анализ и параметр  $Q$  (2), являющийся показателем не только интенсивности вторичного преобразования, но и СЭП. При граничной величине  $Q_{\text{гр}} > 0,3$  и в зоне границ  $I_{\text{уб}} + I_{\text{д}}$  вероятность выявления нефтенасыщенных пластов (на территории Томской области из 269 испытанных интервалов) равна:

$$P(Q) = 11/14 = 0,78 \text{ д. ед.}$$

В этом случае в выборке осталось ~27 % от общего количества нефтенасыщенных коллекторов. Но зато коэффициент успешности в определении перспективных и рекомендованных к испытанию интервалов, в сравнении с традиционным методом интерпретации ГИС, увеличивается в 5 раз.

Итак, выбранные граничные величины параметров  $I$ ,  $Q$  являются критерием и индикатором нефтенасыщенности низкоомных (и не только) коллекторов для территории Томской области. Остается открытым вопрос о территориальной (по Западной Сибири) универсальности данных параметров. С целью ответа на поставленный вопрос проведем сравнение результатов «работы» рассматриваемых индикаторов по поиску УВ пластов на месторождении Самотлор с месторождениями Томской области.

На основе базы данных имеющейся выборки испытанных интервалов (40 нефтенасыщенных и 59 водонасыщенных пластов мезозойских отложений) месторождения Самотлор была проведена статистическая интерпретация материалов ГИС по представленным скважинам. На основании полученных результатов были вычислены средние значения рассматриваемых параметров (табл. 2).

Таблица 2. Усредненные результаты статистической интерпретации ГИС для нефте- и водонасыщенных интервалов по Самотлору

Table 2. Average results of well logging data interpretation in oil and water saturated intervals in Samotlor

| Насыщение<br>Saturation | $\langle i_{\text{пир}} \rangle$<br>Pyritisation<br>intensity | $\langle i_{\text{као}} \rangle$<br>Kaolinitization<br>intensity | $I$<br>Total<br>intensity | $Q$<br>Concealed<br>electrical<br>conductivity |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------|
|                         | усл. ед./conv. unit                                           |                                                                  |                           |                                                |
| Нефть (Н)<br>Oil (O)    | 0,126                                                         | 0,11                                                             | 2,78                      | 0,40                                           |
| Вода (В)<br>Water (W)   | 0,150                                                         | 0,06                                                             | 2,34                      | 0,28                                           |
| Н/В<br>(O/W)            | 0,84                                                          | 1,83                                                             | 1,18                      | 1,43                                           |

Используя в качестве индикаторов «томские» параметры с оптимальными граничными величинами  $I_{\text{гр}} > 2,4$ ,  $Q_{\text{гр}} > 0,6$ , мы получаем всего лишь 12 % количество выборочных значений нефтенасыщенных коллекторов месторождения Самотлор с 80 % достоверностью. Анализируя табл. 2, можно отметить, что для повышения статистической значимости результатов исследований только интенсивность каолинитизации и параметр СЭП могут являться индикаторами УВ насыщения изучаемых интервалов. Поэтому в качестве индикаторов нефтенасыщенности для месторождения Самотлора принимаются данные параметры со следующими граничными величинами:  $i_{\text{као}} > 0,13$ ,  $Q_{\text{гр}} > 0,4$ . В этом случае в исследуемой выборке остается ~27 % от общего количества нефтенасыщенных коллекторов при вероятности, равной:

$$P(Q)_{\text{инт}} = 11/13 = 0,84 \text{ д. ед.}$$

Итак, согласно полученным результатам анализа статистических исследований можно сделать

следующий вывод: для территорий с различной геологией необходимо эмпирическим путем подбирать не только величины граничных параметров, но и сами параметры-индикаторы УВ присутствия в исследуемых коллекторах. Только параметр СЭП универсален и может служить критерием нефтенасыщенности низкоомных интервалов.

По количеству нефтенасыщенных пластов в меловых отложениях, между Томской областью и Самотлором выявляется следующее различие – 5 % по Томской области и ~60 % по Самотлору от общего количества мезозойских УВ пластов. Очевидно, этот факт обусловлен различием в величинах плотности разломов растяжения, секущих баженоскую свиту, являющуюся, в свою очередь, покрывкой для глубинных флюидов. На относительно небольшой территории Самотлора плотность каналов миграции в покрывке гораздо выше, чем на исследуемой территории Томской области [30, 31]. В этом случае усредненные интенсивности вторичных преобразований (обусловленные глубинными флюидами) будут больше на той территории, где плотность разломов покрывки меньше, т. е. в юрских отложениях Томской области. Это видно по результатам анализа табл. 1 и 2.

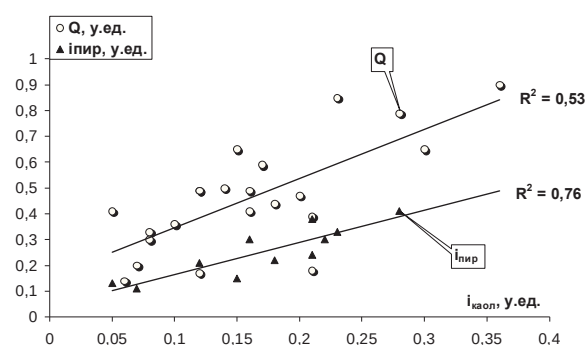


Рис. 2. Сопоставление интенсивности пиритизации и параметра СЭП с интенсивностью каолинитизации в нефтенасыщенных интервалах месторождения Самотлора. (Прим. СЭП ( $Q$ ) – скрытая электрическая проводимость)

Fig. 2. Correlation between pyritization intensity, CEC parameter and kaolinitization intensity in oil saturated intervals of Samotlor field. (Note. CEC ( $Q$ ) is the concealed electrical conductivity)

Еще одним важным отличительным признаком в нефтенасыщенных коллекторах месторождения Самотлор в сравнение с коллекторами Томской области будет различие причин «низкоомности». Многочисленные публикации различных авторов по Томской области подтверждают, что доминирующей причиной проявления УВ насыщенных низкоомных коллекторов являются содержащиеся в полимиктовых песчаниках пириты и вторичные глинистые минералы [23–25]. Доля интенсивностей вторичных процессов пиритизации и пелитизации будет представлять основной вклад в величину параметра СЭП. Как правило, эти минералы в песчаных породах формируются в резуль-

тате поступления глубинных флюидов по фильтрационным каналам, образованным тектоническими процессами земной коры [4].

В отличие от Томской области, на территории Самотлора еще одной первопричиной «низкоомности» является фациальная (прибрежно-морская) обстановка осадконакопления. Прибрежно-морская обстановка седиментации формирует слоистую структуру по латерали с чередованием песчаных слоев с тонкими глинистыми прослоями [30]. Причем данные латерально протяженные прослои не выделяются на каротажных диаграммах вследствие их незначительных толщин, поэтому продуктивные пласты с низким удельным электрическим сопротивлением пропускаются. Электрическая проводимость пласта будет определяться её анизотропией, т. е. не только вертикальной, но и повышенной латеральной компонентами.

Корреляционный анализ вычисленных статистических параметров в нефтенасыщенных интервалах Самотлора позволил выявить две положительные регрессии интенсивности каолинитизации с интенсивностью пиритизации и параметром СЭП (рис. 2). На рис. 2 нулевые параметры не учитываются. В водонасыщенных пластах данные корреляции отсутствуют. Это подтверждает парагенетическую связь вторичных процессов каолинитизации и пиритизации с УВ. В свою очередь СЭП представляет собой аддитивную совокупность влияний на УЭС породы процессов пиритизации, пелитизации и образования ДЭС глин с повышенной электрической проводимостью. Анализ долевых величин показал, что основной вклад в долю СЭП в нефтенасыщенных пластах Самотлора оказывает ДЭС глинистой фракции, т. е. данный факт можно рассматривать как вторичное преобразование *первичного* (слоистого) глинистого цемента

при каолинитизации полевых шпатов с последующей диффузией образованных катионов в ДЭС. В величине параметра СЭП доля пиритизации незначительная. Вследствие чего можно утверждать, что с ростом интенсивности каолинитизации повышается электрическая проводимость диффузионного слоя ДЭС, которая приводит к увеличению параметра СЭП.

#### Заключение

Проведенный анализ связей наложено-эпигенетических процессов с нефтенасыщенностью коллектора позволяет определить следующую закономерность – интенсивности вторичной пиритизации и каолинитизации могут служить индикаторами присутствия углеводородов в песчаных интервалах. Синхронность наложено-эпигенетических процессов пиритизации и каолинитизации в песчаных интервалах связана с нефтенасыщением. Для различных территорий с УВ залежами необходимо эмпирическим путем подбирать не только величины граничных параметров, но и сами параметры-индикаторы (вторичной пиритизации и каолинитизации) УВ присутствия в исследуемых коллекторах. Только параметр СЭП универсален и может служить критерием нефтенасыщенности низкоомных интервалов.

Эмпирические исследования показали, что по Томской области и Самотлору коэффициент успешности применения данных индикаторов для выявления УВ ~80 % при 27 % количестве выделенных перспективных коллекторов от общего их числа.

Таким образом, использование технологии статистической интерпретации данных ГИС позволяет выявлять (с высокой степенью достоверности) пропущенные нефтенасыщенные низкоомные интервалы на базе старого фонда материалов ГИС.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических процессов в осадочных бассейнах. – Л.: Недра, 1992. – 239 с.
2. Природный тектонический насос углеводородов и вторичная доломитизация – порождение тектоно-гидротермальной активности рифтогенного осадочного бассейна / А.Д. Коробов, Л.А. Коробова, Е.Ф. Ахлестина, А.Т. Колотухин, В.М. Мухин // Известия Саратовского университета. Серия «Науки о Земле». – 2015. – Т. 15. – Вып. 3. – С. 46–52.
3. Роль дизъюнктивной тектоники в формировании пустотного пространства в коллекторах пласта Ю<sub>1</sub><sup>8</sup> Западно-Моисеевского участка Двуреченского нефтяного месторождения (Томская область) / Н.М. Недоливко, А.В. Ежова, Т.Г. Перевертайло, Е.Д. Полумогина // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 5. – С. 47–53.
4. Предтеченская Е.А., Шиганова О.В., Фомичев А.С. Катагенетические и гидрохимические аномалии в нижнесреднеюрских нефтегазоносных отложениях Западной Сибири как индикаторы флюидодинамических процессов в зонах дизъюнктивных нарушений // Литосфера. – 2009. – № 6. – С. 54–65.
5. Предтеченская А.Е. Минералогические аномалии как индикаторы процессов флюидомиграции в юрских нефтегазоносных отложениях Западно-Сибирской плиты // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: Материалы VII Всероссийского литологического совещания. – Новосибирск, 28–31 октября 2013. – Новосибирск: Институт Нефтегазовой геологии и геофизики имени академика А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, 2013. – С. 400–405.
6. Сахибгареев Р.С. Эпигенез юрских и меловых отложений центральной части Западно-Сибирской низменности // Советская геология. – 1970. – № 5. – С. 143–146.
7. Сердюк З.Я., Слепокурова Л.Д. Геолого-геофизические аномалии и их роль при поисках неантиклинальных ловушек УВ в нефтегазоносных толщах Западной Сибири // Горно-геологическое образование в Сибири. 100 лет на службе науки и производства: Материалы международной научно-технической конференции. – Томск: Томский Государственный университет, 2001. – С. 243–246.
8. Чепиков К.Р., Ермолова Е.П., Орлова Н.А. Эпигенетические минералы как показатели времени прихода нефти в песчаные промышленные коллекторы // Докл. АН СССР. – 1959. – Т. 125. – № 5. – С. 1097–1099.
9. Геохимические критерии выявления коллекторов и прогноза их нефтегазоносности в терригенных отложениях Пур-Тазовской нефтегазоносной области / Е.Р. Исаева, В.Г. Ворошилов,

- Т.Ф. Тимкин, М. Ziail // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 132–141.
10. Lasaga A.C. Chemical kinetics of water-rock interactions // J. Geophys. Res. – 1984. – V. 89. – P. 4009–4025.
11. Duan S., Wojtanowicz A.K. Theoretical and experimental investigation of water in oil transverse dispersion in porous media // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Denver, Colorado, USA, 2008. – P. 1376–1401.
12. Alteration of crude oil by waters and bacteria; evidence from geochemical and isotope studies / N.J.L. Bailey, H.R. Krouse, C.R. Evans, M.A. Rogers // AAPG Bull. – 1973. – V. 57. – P. 1276–1290.
13. Velbel M.A. Influence of surface area, surface characteristics, and solution composition on feldspar weathering rates // Symposium Series: Geochemical Processes at Mineral Surfaces. – Chicago, Illinois, 1986. – № 323. – P. 614–634.
14. Worden R.H., Burley S.D. Sandstone diagenesis. Recent and Ancient. – USA: Blackwell Publishing company, 2003. – 647 p.
15. Worden R.H., Morad S. Clay Mineral Cements in Sandstones. – USA: Blackwell Publ. company, 2003. – 503 p.
16. Bjorkum P.A., Gielsvik N. An isochemical model for formation of authigenic kaolinite, K-feldspar and illite in sediments // J. sedim. Petrol. – 1988. – V. 58. – P. 506–511.
17. Shengkai D., Wojtanowicz A.K. Hydrodynamic transition zone at OWC in non-Darcy flow // The second International Energy 2030 conference. – Abu Dhabi U.A.E., 2008. – P. 84–86.
18. Helgeson H.C., Owens C.E., Shock E.L. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages: are they in metastable equilibrium in hydrocarbon reservoirs? // Geochimica et Cosmochimica Acta, Abstr. – 1993. – V. 57. – P. 3295–3339.
19. Мельник И.А. Выявление вторично преобразованных терригенных коллекторов на основе статистической интерпретации материалов ГИС // Геофизика. – 2013. – № 4. – С. 29–36.
20. Мельник И.А. Латеральная миграция флюидов и интенсивность вторичной каолинизации в терригенных отложениях Томской области // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2016. – № 4 (28). – С. 9–14.
21. Мельник И.А. Интенсивность пиритизации как индикатор характера насыщения юрских пластов Томской области // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 3. – С. 41–49.
22. Мельник И.А. Определение интенсивности геохимических процессов по материалам геофизических исследований скважин. – Новосибирск: Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья, 2016. – 146 с.
23. Мельник И.А. Причины понижения электрического сопротивления в низкоомных коллекторах // Геофизические исследования. – 2014. – № 4. – С. 44–53.
24. Ежова А.В. Методика оценки нефтенасыщенности низкоомных коллекторов в юрских отложениях Юго-Востока Западно-Сибирской плиты // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 6. – С. 23–26.
25. Проблема выделения низкоомных коллекторов сложного строения юрских отложений Каймысовского свода / Ю.А. Чикишев, Н.П. Ковалева, В.А. Резниченко, Р.А. Шишкин // НТВ ОАО «НК «Роснефть». – 2008. – № 1. – С. 17–21.
26. Мельник И.А., Зимина С.В., Смирнова К.Ю. Нефтегазоносность территории Томской области как результат глубинной миграции // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2017. – № 3. – С. 17–22.
27. Тимурзиев А.И. Современное состояние гипотезы осадочно-миграционного происхождения нефти (вопросы миграции УВ) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2009. – № 12. – С. 30–38.
28. Козеренко С.В., Храмов Д.А., Фадеев В.В. Исследование механизма образования пирита в водных растворах при низких температурах и давлениях // Геохимия. – 1995. – № 9. – С. 1553–1565.
29. Тараненко Е.И., Безбородов Р.С., Хакимов М.Ю. Преобразование коллекторов в нефтяных залежах // Геология нефти и газа. – 2001. – № 2. – С. 18–22.
30. Геологическое моделирование прибрежно-морских отложений (на примере пласта АВ1 (АВ11+2+АВ13) Самотлорского месторождения) / под ред. К.Е. Закревского. – Тюмень: Вектор Бук, 2017. – 314 с.
31. Конторович В.А. Тектоника и нефтегазоносность мезозойско-кайнозойских отложений юго-восточных районов Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2002. – 253 с.

Поступила 03.04.2019 г.

#### Информация об авторах

**Мельник И.А.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.83+552.5+553.98

## INTENSITIES OF SUPERIMPOSED EPIGENESIS AS INDICATORS OF OIL SATURATION IN SANDSTONE RESERVOIRS

Igor A. Melnik,  
migranis@mail.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the possibility to identify missed (low-resistivity) productive reservoirs in sandstone intervals, based on the available well-logging data with the focus on the intervals with no core data.

**The aim** of the research is to apply the intensity of superimposed epigenetic processes in sandstones as an indicator of oil saturation in sandstone reservoirs in Western Siberia.

**Objects:** Upper Middle Jurassic sandstone deposits in Tomsk region and Achimov sequence of early Cretaceous sandstone deposits in Samotlor field.

**Methods.** A proprietary innovative statistical technique to interpret well-logging data is used to identify the intensities of superimposed epigenesis of kaolinitization, carbonatization, pyritization, pelitization and missed low-resistivity hydrocarbon-bearing reservoirs.

**Results.** It is proved that the intensity parameters of superimposed epigenesis of kaolinitization and pyritization for Jurassic and Cretaceous sand deposits in Western Siberia can be used as indicators of oil saturation in the reservoirs. The cutoff values for Tomsk region and Samotlor are identified. Paragenesis of superimposed epigenetic processes of pyritization and kaolinitization in sandstone intervals signifies hydrocarbon saturation of the intervals. Empirical evidence proves that the success rate of the applied indicators is ~75–80 % if the indicators are estimated by the innovative statistical technique for well logging data interpretation.

**Conclusion.** The use of the innovative statistical technique for well logging data interpretation allows identifying missed oil-bearing low-resistivity intervals based on the well-logging data obtained earlier. It also enables solving lithological, petrophysical, and geological tasks (conditioned by deep fluid migration) while oil and gas prospects.

### Key words:

Superimposed epigenetic process, secondary kaolinitization, secondary pyritization, low resistivity reservoir, hydrocarbons, specific electric resistivity, well logging.

### REFERENCES

1. Lebedev B.A. *Geokhimiya epigeneticheskikh protsessov v osadochnykh basseynakh* [Geochemistry of epigenetic processes in sedimentary basin]. Leningrad, Nedra Publ., 1992. 239 p.
2. Korobov A.D., Korobova L.A., Akhlestina E.F., Kolotukhin A.T., Mukhin V.M. Prirodny tektonicheskiy nasos uglevodorodov i vtorichnaya dolomitizatsiya – porozhdenie tektono-gidrotermalnoy aktivnosti riftogennogo osadochnogo basseyna [Hydrocarbon natural tectonic Pump and secondary dolomitization as a Result of tectonic-hydrothermal Activity in a rift sedimentary Basin]. *Izvestiya of Saratov University. Earth science*, 2015, vol. 15, Iss. 3, pp. 46–52.
3. Nedolivko N.M., Ezhova A.V., Perevertaylo T.G., Polumogina E.D. Role of disjunctive tectonics in formation of voids in reservoirs, Laya Yu<sup>1</sup>, Zapadno-Moisevskiy site Dvurechenskoy field (Tomskaya oblast). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic university*, 2005, vol. 308, no. 5, pp. 47–53. In Rus.
4. Predtechenskaya E.A., Shiganova O.V., Fomichev A.S. Katageneticheskie i gidrokhimicheskie anomalii v nizhneshredneyurskikh neftegazonosnykh otlozheniyakh Zapadnoy Sibiri kak indikator flyuidodinamicheskikh protsessov v zonakh dizyunktivnykh narusheniy [Catagenetic and hydrochemical anomalies in Lower-Middle Jurassic oil-and-gas bearing deposits in West Siberia as indicators of fluid-dynamic processes in disjunctive dislocation zones]. *Litosfera*, 2009, no. 6, pp. 54–65.
5. Predtechenskaya A.E. Mineralogicheskie anomalii kak indikator protsessov flyuidomigratsii v yurskikh neftegazonosnykh otlozheniyakh Zapadno-Sibirskoy plity [Mineralogical abnormalities as indicators of fluid migration in Jurassic oil bearing deposits of the Western Siberian plate]. *Osadochnye basseyny, sedimentatsionnye i postsedimentatsionnye protsessy v geologicheskoy istorii. Materialy VII Vserossiyskogo litologicheskogo soveshchaniya* [Sedimentary basins, sedimentation and post-sedimentation in geological history. Proc. of the VII All Russian lithological Conference]. Novosibirsk, 28–31 October, 2013. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2013. pp. 400–405.
6. Sakhibgareev R.S. Epigenez yurskikh i melovykh otlozheniy tsentralnoy chasti Zapadno-Sibirskoy nizmennosti [Epigenesis of Jurassic and Cretaceous deposits in central part of Western Siberian lowland]. *Sovetskaya geologiya*, 1970, no. 5, pp. 143–146.
7. Serdyuk Z.Ya., Slepokurova L.D. Geologo-geofizicheskie anomalii i ikh rol pri poiskakh neantiklinalnykh lovushek UV v neftegazonosnykh tolshchakh Zapadnoy Sibiri [Geophysical anomalies and their role in prospecting non-anticlinal hydrocarbon traps in oil-bearing formation]. *Gorno-geologicheskoe obrazovanie v Sibiri. 100 let na sluzhbe nauki i proizvodstva. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geological and mining education in Western Siberia: 100 years on duty of science and industry. Proceedings of international scientific conference]. Tomsk, TSU Publ., 2001. pp. 243–246.
8. Chepikov K.R., Ermolova E.P., Orlova N.A. Epigeneticheskie mineraly kak pokazateli vremeni prikhoda nefti v peschanye promyshlennye kollektory [Epigenetic minerals as indicators of oil inflow time in production sandstone reservoirs]. *Report AS USSR*, 1959, vol. 125, no. 5, pp. 1097–1099.
9. Isaeva E.R., Voroshilov V.G., Timkin T.F., Mansour Ziari. Geochemical criteria to identify reservoirs and to forecast their oil and gas content in terrigenous deposits in Pur-Tazovskoy oil-bearing field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 4, pp. 132–141. In Rus.
10. Lasaga A.C. Chemical kinetics of water-rock interactions. *J. Geophys. Res.*, 1984, vol. 89, pp. 4009–4025.
11. Duan S., Wojtanowicz A.K. Theoretical and experimental investigation of water in oil transverse dispersion in porous media. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, Colorado, USA, 2008. pp. 1376–1401.

12. Bailey N.J.L., Krouse H.R., Evans C.R., Rogers M.A. Alteration of crude oil by waters and bacteria; evidence from geochemical and isotope studies. *AAPG Bull.*, 1973, vol. 57, pp. 1276–1290.
13. Velbel M.A. Influence of surface area, surface characteristics, and solution composition on feldspar weathering rates. *Symposium Series: Geochemical Processes at Mineral Surfaces*. Chicago, Illinois, 1986. No. 323, pp. 614–634.
14. Worden R.H., Burley S.D. *Sandstone diagenesis. Recent and Ancient*. USA, Blackwell Publishing company, 2003. 647 p.
15. Worden R.H., Morad S. *Clay Mineral Cements in Sandstones*. USA, Blackwell Publ. company, 2003. 503 p.
16. Bjorkum P.A., Gielsvik N. An isochemical model for formation of authigenic kaolinite, K-feldspar and illite in sediments. *J. sedim. Petrol.*, 1988, vol. 58, pp. 506–511.
17. Shengkai D., Wojtanowicz A.K. Hydrodynamic transition zone at OWC in non-Darcy flow. *The second International Energy 2030 conference*. Abu Dhabi U.A.E., 2008. pp. 84–86.
18. Helgeson H.C., Owens C.E., Shock E.L. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages: are they in metastable equilibrium in hydrocarbon reservoirs? *Geochimica et Cosmochimica Acta, Abstr.*, 1993, vol. 57, pp. 3295–3339.
19. Melnik I. A. Vyyavlenie vtorichno preobrazovannykh terrigennykh kolektorov na osnove statisticheskoy interpretatsii materialov GIS [Identification of secondary converted terrigenous reservoirs based on the statistical interpretation data GIS]. *Geofizika*, 2013, no. 4, pp. 29–36.
20. Melnik I.A. Lateralnaya migratsiya flyuidov i intensivnost vtorichnoy kaolinizatsii v terrigennykh otlozheniyakh Tomskoy oblasti [Lateral migration of fluids and intensity of secondary kaolinisation in terrigenous deposits of the Tomsk region]. *Geologiya i mineralno-syrevye resursy Sibiri*, 2016, no. 4 (28), pp. 9–14.
21. Melnik I.A. Intensivnost piritizatsii kak indikator kharaktera nasyscheniya yurskikh plastov Tomskoy oblasti [Pyritization intensity as an indicator of the nature of the Jurassic formations saturation in Tomsk region]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefityanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2016, no. 3, pp. 41–49.
22. Melnik I.A. *Opredelenie intensivnosti geokhimicheskikh protsessov po materialam geofizicheskikh issledovaniy skvazhin* [Evaluating intensity of geochemical processes by well-logging data]. Novosibirsk, Publ., SNIIGiMS. 2016. 146 p.
23. Melnik I.A. Prichiny ponizheniya elektricheskogo soprotivleniya v nizkoomnykh kolektorakh [Causes of decrease in electrical resistance in low resistivity reservoirs]. *Geofizicheskie issledovaniya*, 2014, no. 4, pp. 44–53.
24. Ezhova A.V. Method to evaluate oil saturation of low resistivity reservoirs in Jurassic deposits, the South-east of Western Siberian plate. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 6, pp. 23–26. In Rus.
25. Chikishev Yu.A., Kovaleva N.P., Reznichenko V.A., Shishkin R.A. Problema vydeleniya nizkoomnykh kolektorov slozhnogo stroeniya yurskikh otlozheniy Kaymysovskogo svoda [Identifying low resistivity reservoirs with complicated geological structure in Jurassic deposits of Kaymysovsky arch]. *NTV OAO «NK «Rosneft»*, 2008, no. 1, pp. 17–21.
26. Melnik I. A., Zimina S.V., Smirnova K. Yu. Neftegazonosnost territorii Tomskoy oblasti kak rezultat glubinnoy migratsii [Hydrocarbon potential of Tomsk region as a result of depth migration]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefityanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2017, no. 3, pp. 17–22.
27. Timurziev A.I. Sovremennoe sostoyanie gipotezy osadochno-migratsionnogo proiskhozhdeniya nefi (voprosy migratsii UV) [Modern development of the hypothesis about sedimentary and migration oil formation (the issues of hydrocarbon migration)]. *Geologiya, geofizika i razrabotka nefityanykh i gazovykh mestorozhdeniy*, 2009, no. 12, pp. 30–38.
28. Kozerenko S.V., Khramov D.A., Fadeev V.V. Issledovanie mekhanizma obrazovaniya pirita v vodnykh rastvorakh pri nizkikh temperaturakh i davleniyakh [Studying pyritization in water solutions at low temperatures and pressures]. *Geokhimiya*, 1995, no. 9, pp. 1553–1565.
29. Taranenko E.I., Bezborodov R.S., Khakimov M. Yu. Preobrazovanie kolektorov v nefityanykh zalezakh [Reservoir transformation in oil bearing formations]. *Geologiya nefi i gaza*, 2001, no. 2, pp. 18–22.
30. *Geologicheskoe modelirovanie pribrezhno-morskikh otlozheniy (na primere plasta AV1 (AV11+2+AV13) Samotlorskogo mestorozhdeniya)* [Geological modelling of near shore-marine sediments (case study of AV1 (AV11+2+AV13) formation in Samotlor field)]. Ed. by K.E. Zakrevsky. Tyumen, Vektor Buk Publ., 2017. 314 p.
31. Kontorovich V.A. *Tektonika i neftegazonosnost mezozoysko-kaynozoykskikh otlozheniy yugo-vostochnykh rayonov Zapadnoy Sibiri* [Tectonics and oil and gas potential of mesozoic-kainozoic deposits, South-eastern regions of Western Siberia]. Novosibirsk, SB RAS Publ., «GEO» branch, 2002. 253 p.

Received: 3 April 2019.

#### Information about the authors

Igor A. Melnik, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 620.19, 621.039.586, 621.039.524.2.034.3

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОРРОЗИИ SiC-ПОКРЫТИЯ НА ГРАФИТЕ

**Аскербеков Саулет Каныбекулы<sup>1</sup>,**  
askerbekov@physics.kz

**Чихрай Евгений Васильевич<sup>1</sup>,**  
chikhray@physics.kz

**Понкратов Юрий Валентинович<sup>2</sup>,**  
ponkratov@nnc.kz

**Никитенков Николай Николаевич<sup>3</sup>,**  
nikitenkov@tpu.ru

<sup>1</sup> Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби,  
Казахстан, 050040, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71.

<sup>2</sup> Национальный ядерный центр Республики Казахстан,  
Казахстан, 071100, Курчатова, ул. Красноармейская, 10.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования обусловлена перспективой создания казахстанского высокотемпературного газоохлаждаемого реактора, в котором будет применен новый набор реакторных графитов и пиролитических углеродных покрытий элементов топлива. На топливных элементах реактора будут использованы покрытия из карбида кремния (SiC) поверх графитовой или пироуглеродной основы.

**Цель:** определить скорость и особенности протекания высокотемпературной коррозии реакторного графита с SiC-покрытием в диапазоне температур от 750 до 1400 °С при начальном давлении паров воды в камере 100 Па.

**Объект:** изотропный мелкозернистый графит марки IG-110 с защитным SiC-покрытием толщиной 200 мкм.

**Методы:** десорбция продуктов коррозии с поверхности и объема образца в присутствии паров воды при различных исследуемых температурах, масс-спектрометрическая регистрация состава газов в рабочей камере, микроструктурные исследования, Рамановская спектроскопия, энерго-дисперсная рентгеновская спектроскопия.

**Результаты.** Установлено, что реакция SiC-покрытия с водяным паром при давлении 100 Па и выше происходит с образованием защитного слоя аморфного диоксида кремния SiO<sub>2</sub> (пассивное окисление SiC). Коррозия SiC в парах воды при температурах 1100–1400 °С происходит на порядок интенсивнее, чем при 750–900 °С. Разработана модель для аналитического описания результатов экспериментов и рассчитаны значения скорости реакции водяного пара с покрытием SiC при температурах 1400, 1300, 1200, 1100 и 1000 °С. Анализ изменения микроструктуры образцов после коррозионного эксперимента свидетельствует об образовании на поверхности карбида кремния защитного слоя SiO<sub>2</sub>, характерного для механизма пассивного окисления SiC. Результаты исследования позволяют заключить, что реакторный графит с SiC-покрытием обладает лучшими антикоррозионными свойствами по сравнению с чистым графитом, а SiC может быть применен для химической защиты графитовых и углеродных слоев топлива высокотемпературного газоохлаждаемого реактора.

### **Ключевые слова:**

Реакторный графит, SiC-покрытие, ВТГР, коррозия, водяной пар.

### **Введение**

Тематика материаловедческих исследований в области ядерных и термоядерных установок является традиционной для казахстанской науки [1]. На установках Института Атомной Энергии (ИАЭ), Института Ядерной Физики (ИЯФ) и Института экспериментальной и теоретической физики было исследовано множество конструкционных и функциональных материалов для будущих ядерных и термоядерных реакторов [2–11].

Одним из таких исследований являются эксперименты по коррозии SiC-покрытий реакторного графита, результаты которых представлены в настоящей статье.

Условия использования графита и пиролитического углерода в элементах топлива и конструкции

активной зоны реакторов деления (высокие температуры и давления) подразумевают постоянное химическое воздействие на них имеющихся в охлаждающих остаточных примесей кислорода и воды (водяного пара). Это особенно актуально для реакторов типа ВТГР (высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов).

Изучение возможных направлений изменения технологических параметров реакторного графита ВТГР при его контакте с воздухом и водой в ходе штатной эксплуатации и при проектных авариях (вплоть до разрушения его структуры) является актуальной и обязательной задачей исследований, обеспечивающей безопасность этого типа реакторов.

Для снижения возможного разрушения графитовых материалов газового реактора предлагается

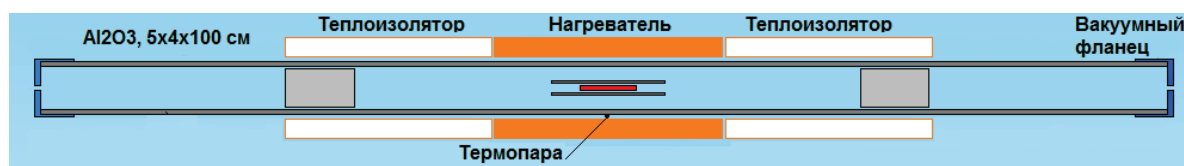


*Рис. 1. Схема расположения элементов рабочей камеры установки для исследования коррозии графитов на базе трубчатой печи GSL-1600*

**Fig. 1.** Layout of the working chamber elements of the facility for studying graphite corrosion on the basis of GSL-1600 tube furnace

использовать разнообразные покрытия [12–14], в частности покрытия на основе карбида кремния [15].

Таким образом, проведение экспериментов по исследованию взаимодействия карбид-кремниевых защитных покрытий с химическими активными газами (воздух, вода и т. д.) остается одной из актуальных и приоритетных задач [15–26]. Задачей настоящего исследования было оценить скорость и закономерности протекания высокотемпературной коррозии реакторного графита с SiC-покрытием в диапазоне температур 750–1400 °C в присутствии паров воды (~100 Па).

## Исследуемый материал

В работе проведены испытания нового защитного покрытия SiC на изотропном мелкозернистом графите марки IG-110 и исследована его защитная способность. SiC-покрытие толщиной 200 мк наносилось на графит методом пиролиза метилтрихлорсилана  $\text{CH}_3\text{SiCl}_3$  [27]. По результатам рентгенофазового анализа структура полученного покрытия соответствует  $\beta$ -фазе карбида кремния (3C-SiC) с кубической решеткой пространственной группы F43m (216) [19]. Полученный образец графита имел форму параллелепипеда размерами 4×4×45 мм. Образец вырезан из массивного блока графита перпендикулярно оси его технологическо-

го сжатия при изготовлении. При этом образец весил примерно один грамм, плотность графита была 1,78 г/см<sup>3</sup>, уровень примесей ~2 ppm, прочность на изгиб 39 МПа, твердость по Шору 51.

### Экспериментальная установка

Коррозионные эксперименты с образцами реакторного графита проводились на установке Corr-SiC'a [19]. Основой установки является горизонтальная вакуумная печь типа GSL-1600 (рис. 1) с двумя боковыми загрузочными фланцами. Вакуумная камера печи образуется основной коррундовой трубой ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  ~99,5 %) и обеспечивает программируемый нагрев исследуемого образца в газовой среде или в вакууме до 1600 °С. Толщина стенки трубы 5 мм, внутренний диаметр 40 мм, длина зоны нагрева 400 мм. Вакуумное уплотнение вынесенных концов трубы камеры на каждом из торцов создается двумя прижимными кольцами высококачественного термостойкого силикона, обеспечивающими натекание воздуха не более 0,0025 Па·л/мин. Печь обеспечивает 150 мм зоны однородного нагрева при точности регулировки температуры  $\pm 1$  °С. Температура измеряется защищенной штатной термопарой (тип S, 87 % Pt/13 % Rh-Pt, максимальная погрешность  $\pm 1,5$  °С), расположенной, как показано на рис. 1. Одновременно в печь можно загрузить до восьми

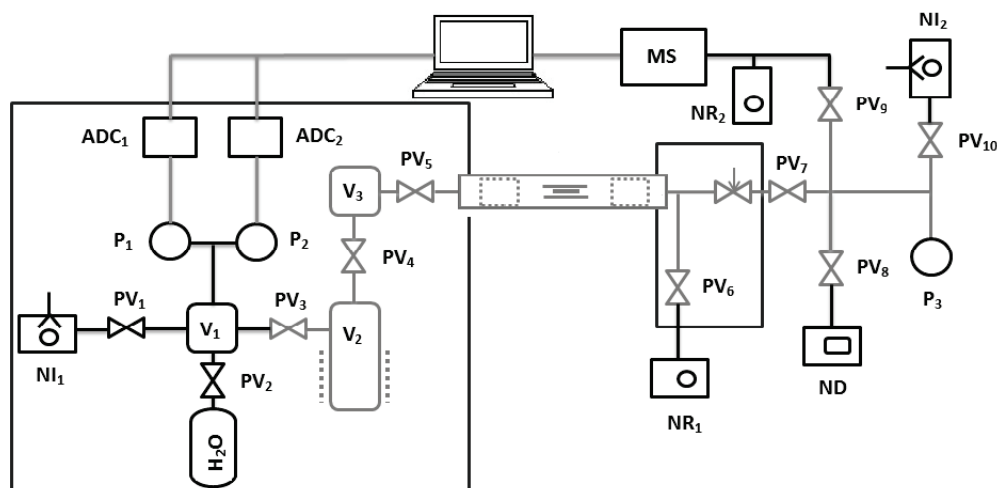


**Рис. 2.** Структурная схема установки для исследования коррозии графитов:  $NI_{1-2}$  – форвакуумные насосы;  $PV_{1-10}$  – клапаны;  $P_{1-3}$  – датчики давления;  $V_{1-3}$  – вакуумные камеры;  $NR_{1-2}$  – турбомолекулярные насосы;  $ND$  – магниторазрядный насос;  $MS$  – масс-спектрометр;  $ADC_{1-2}$  – аналого-цифровые преобразователи

**Fig. 2.** Block diagram of the facility for studying graphite corrosion:  $NI_{1-2}$  – forevacuum pump;  $PV_{1-10}$  – valve;  $P_{1-3}$  – pressure sensor;  $V_{1-3}$  – vacuum chamber;  $NR_{1-2}$  – turbomolecular pump;  $ND$  – magnetic discharge pump;  $MS$  – mass spectrometer;  $ADC_{1-2}$  – analog-to-digital converter

образцов указанного выше размера. Защита боковых загрузочных фланцев и силиконовых уплотнительных колец от перегрева излучением осуществляется путем установки в камеру печи специальных тепловых экранов, изготовленных из корунда. Тепловые экраны образуют зазор (3–5 мм) со стенками печи, что удерживает температуру фланцев ниже 150 °С даже при температуре в центре 1500 °С, не нарушая при этом движения медленных газовых потоков.

Для мониторинга состава газовой среды в рабочей камере установки используется квадрупольный масс-анализатор SRS CIS-100 (Stanford Research Systems, Closed Ion Source Gas Analyzer, США). Дополнительно установка оснащена передвижным постом высоковакуумной безмасляной откачки TPS-Mobile (Agilent Technologies), что позволяет эффективно откачивать рабочую камеру и исключить возможность попадания высокомолекулярных органических соединений в вакуумную и аналитическую системы установки. Структурная схема установки приведена на рис. 2, а ее технические параметры – в табл. 1. На рис. 3 показан внешний вид установки.

Таблица 1. Основные параметры установки для исследования коррозии графита

Table 1. Main parameters of the facility for studying graphite corrosion

|                                     |           |                   |
|-------------------------------------|-----------|-------------------|
| Температурный диапазон, °С          | мин./min  | 25                |
| Temperature range, °C               | макс./max | 1600              |
| Скорость нагрева/охлаждения, °С/мин | мин./min  | 0                 |
| Speed of heating/cooling, °C/min    | макс./max | 10                |
| Диапазон давлений, Па               | мин./min  | 10 <sup>-3</sup>  |
| Pressure range, Pa                  | макс./max | 2·10 <sup>5</sup> |
| Исследуемые массы, а.е.м.           | мин./min  | 2                 |
| Investigated masses, a.m.u.         | макс./max | 100               |



Рис. 3. Внешний вид установки для исследования коррозии материалов CorrSiC'a

Fig. 3. Appearance of the CorrSiC'a facility for studying materials corrosion

#### Методика проведения исследований

Подготовка образца к исследованиям заключалась в его очистке от остатков графитового порошка и углеродных отложений. Для этого образец

подвергался ультразвуковой мойке в дважды дистиллированной воде. Далее образец выдерживался при температуре 300 °С в течение 2 часов в муфельной печи, после проводилось его контрольное взвешивание с помощью аналитических весов Sartorius CPA225D (точность 10 мкг). Затем проводилось исследование состояния его поверхности.

После подготовки к испытаниям образец загружался в центр нагреваемой зоны печи в тигле, устанавливались тепловые экраны, печь герметизировалась торцевыми вакуумными фланцами, и включалась вакуумная откачка. При достижении уровня вакуума 0,1 Па включалась регистрация газового состава (с помощью масс-анализатора) и осуществлялся нагрев образца с выбранной скоростью нагрева (5 или 10 °С/мин). Образец нагревался до максимальной температуры 1400 °С в условиях продолжающейся откачки. Необходимо отметить, что минимальное достигаемое давление 0,1 Па определялось парциальным давлением паров воды, десорбируемых с внутренней поверхности трубы печи. При этом остаточные парциальные давления азота и кислорода (натекание через торцевые фланцы) были на 2–3 порядка ниже. Масс-спектрометр непрерывно регистрировал содержание следующих компонентов (массовых чисел): 2 (водород, H<sub>2</sub>), 14-N (CO-28), 16-O (CH<sub>4</sub>), 17-OH (компонента воды), 18 (вода, H<sub>2</sub>O), 28 (CO+N<sub>2</sub>), 32 (O<sub>2</sub>), 44 (CO<sub>2</sub>).

Для создания атмосферы водяного пара при коррозии использовали высокочистую деионизированную дважды дистиллированную воду. Для снижения равновесной концентрации растворенного в воде кислорода ее прогревали в подготовительной камере при температуре 60–70 °С и давлении 0,2 бар, что, согласно расчетам [28], снижает содержание кислорода в воде до 3–4 мг/кг. Далее при температуре 150–180 °С и давлении 150–200 кПа вода переводилась в пар, который подавался с помощью импульсного вентиля из накопителя испарителя (объемом ~4 мл) в камеру печи с образцом (объемом 3,2 л). Давление пара при этом падало до ~100 Па. Окончательное значение давления пара в печи измерялось с помощью датчиков давления и регистрировалось компьютером. Поскольку эксперимент проходил при отключенной откачке печи, давление водяного пара в ней не менялось в ходе эксперимента.

Регистрация кинетики изменения химического состава газов начиналась сразу же после напуска водяного пара в камеру с образцом и продолжалась в течение 10–15 минут. После фиксации равновесной интенсивной коррозии образца в камере печи, с помощью выходного клапана системы откачки остатки водяного пара и продукты химических реакций удалялись из печи. Откачка камеры продолжалась до достижения фоновых значений давления (0,1 Па), после чего температура печи снижалась до следующего требуемого значения. Аналогично регистрировались коррозионные процессы при 1400, 1300, 1200, 1100, 1000, 900, 800, 750 °С.

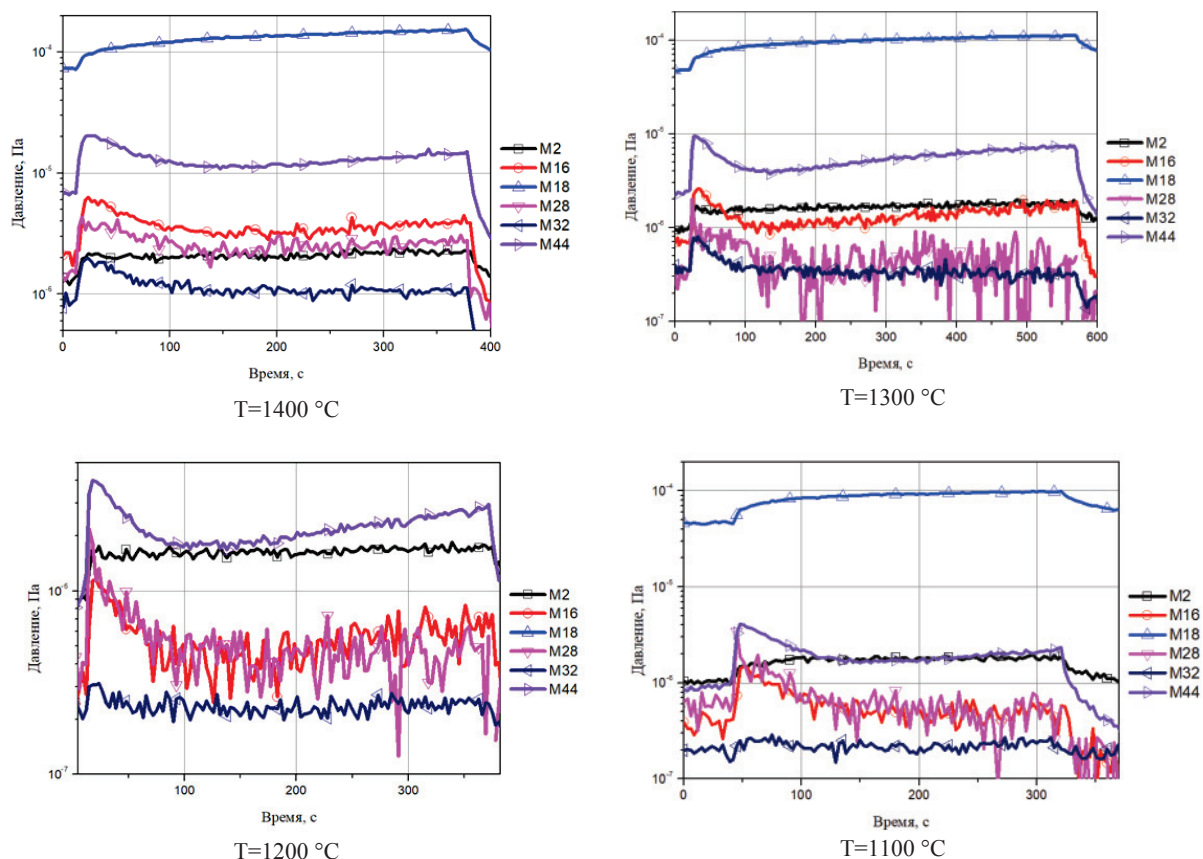


Рис. 4. Временные зависимости изменения состава газа в камере с образцом графита при подаче паров воды (в легенде указаны массовые числа газов)

Fig. 4. Dependences of gas composition change in the chamber with a graphite sample at water vapor supply (mass numbers of gases are indicated in the legend)

После завершения исследования образца его охлаждали до комнатной температуры, заново взвешивали и проводили послекоррозионные исследования его поверхности и микроструктуры.

Таким образом, в ходе одного ступенчатого снижения температуры образца с 1400 до 700 °C регистрировались 7–8 различных по интенсивности и длительности коррозионных процессов. Данная методика нам представляется оптимальной с точки зрения определения скорости высокотемпературной коррозии графита с SiC-покрытием в парах воды и/или воздухе.

#### Результаты экспериментов

На рис. 4 приведены характерные зависимости изменения химического состава (парциальных давлений) основных газовых составляющих коррозионного процесса графита IG-110 с SiC-покрытием при напусках ~100 Па паров воды при различных температурах коррозии.

На типичной кривой изменения давления в коррозионной камере с исследуемым образцом C/SiC после впрыска туда водяного пара можно выделить несколько характерных участков (рис. 5): 1–2 – напуск водяного пара в коррозион-

ную камеру; 2–3 – установление равновесного процесса; 3–4 – линейный рост давления (коррозионный процесс); 4 – момент откачки камеры.

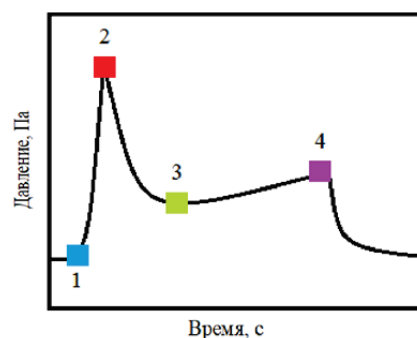


Рис. 5. Характерные участки типичной кривой изменения давления в зависимости от времени газа в камере с образцом графита при подаче паров воды

Fig. 5. Areas of a typical curve of gas pressure change in a chamber with a graphite sample at water vapor supply

#### Реакции и механизмы коррозии SiC-покрытий

Полученные зависимости (рис. 4, 5) определяются целым рядом физико-химических процессов,

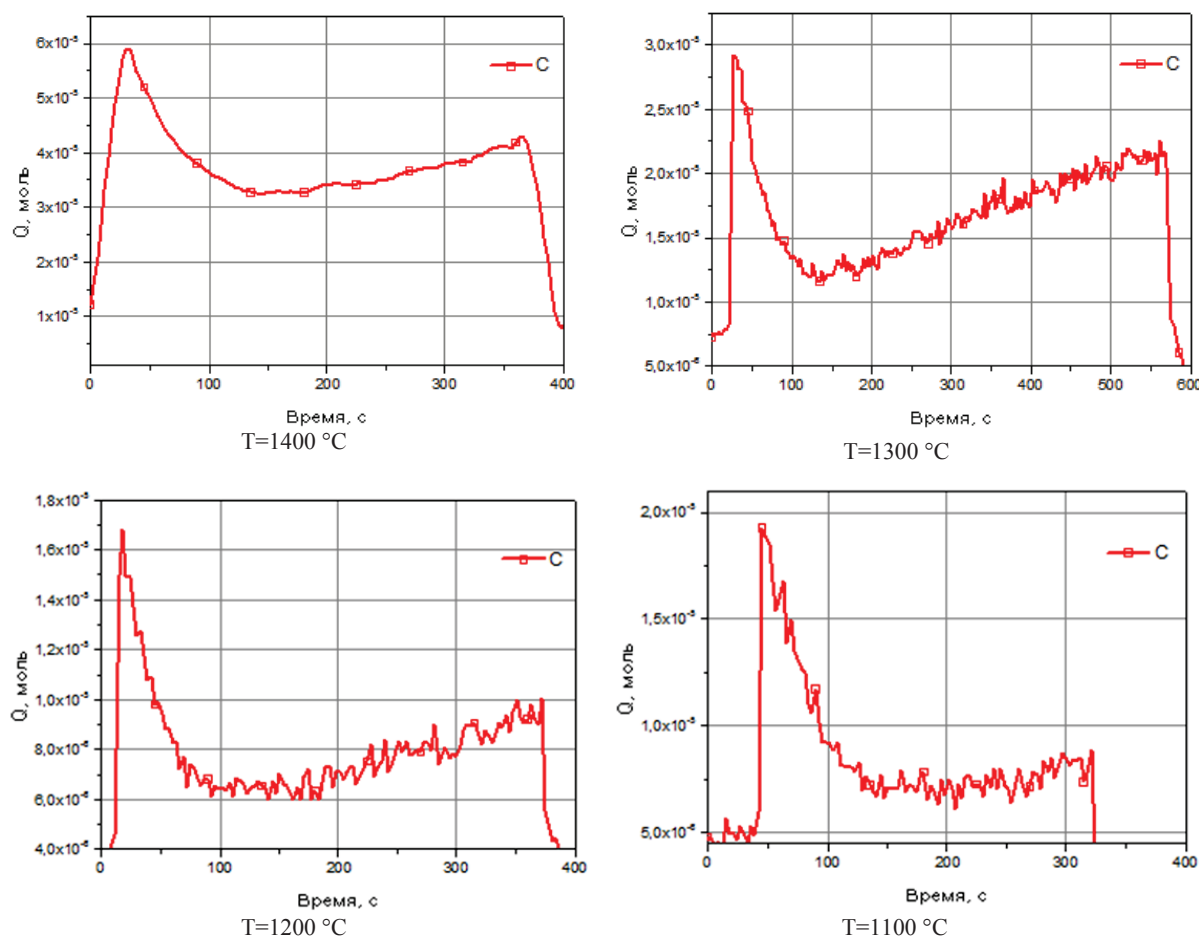
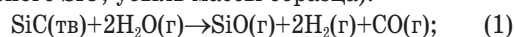


Рис. 6. Временная зависимость количества атомов углерода в рабочей камере при различных температурах

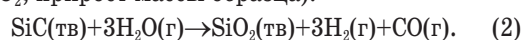
Fig. 6. Time dependence of number of carbon atoms in the working chamber at different temperatures

таких как: сорбция молекул газов из газовой фазы на поверхность, распад этих молекул на атомы, химические реакции атомов газов на поверхности с атомами поверхности, рекомбинация атомов и их десорбция [15–18, 21–26]. Приведем наиболее важные из вышеперечисленных процессов:

1) активное окисление SiC (образование газообразного SiO, убыль массы образца):



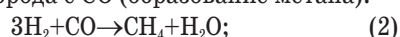
2) пассивное окисление SiC (образование твердого SiO<sub>2</sub>, прирост массы образца):



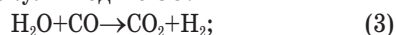
Здесь индексы (тв) и (г) обозначают твердую и газообразную фазы продукта, соответственно.

Важны также реакции взаимодействия газов в коррозионной камере:

А) реакция водорода с CO (образование метана):



Б) реакция молекулы воды с CO:



В) распад метана:



#### Расчет константы скорости взаимодействия пар-SiC-покрытие

Как видно из приведенных выше данных, основными продуктами коррозии, доступными для масс-анализа, являются углеродсодержащие газы и водород [15–18, 28–34]. Определить концентрацию газообразного SiO с помощью квадрупольного масс-анализатора не представляется возможным, т. к. монооксид кремния затвердевает уже при температурах 120–150 °C и высаживается на холодных элементах системы пробозабора масс-анализатора, не доходя до ионизатора, поэтому в балансе не учитывается. В этой ситуации основным контролируемым элементом, определяющим коррозию образца, является углерод в составе образующихся углеродсодержащих газов [35]. При этом скорость коррозии SiC-покрытия в процессе его взаимодействия с парами воды напрямую связана со скоростью увеличения концентрации «газообразного» углерода в коррозионной камере.

Таким образом, используя полученные экспериментальные данные и исходя из перечисленных реакций (1)–(5), можно рассчитать временные за-

висимости изменения концентрации атомов углерода, убывающего из образца в виде оксидов углерода и метана при различных температурах и определить скорость взаимодействия паров воды с SiC-покрытием.

На рис. 6 приведены кривые изменения концентрации углерода, отделившегося от образца после напуска в коррозионную камеру 100 Па воды, полученные из данных рис. 4. Далее из полученных временных зависимостей для участков 3–4 (рис. 5) определяется скорость наработки углерода как  $dQ(t)/dt$ . Для этого проводится линеаризация участка 3–4 и определяется наклон прямой.

Затем константа скорости взаимодействия  $H_2O$  с SiC-покрытием определяется как:

$$k = \frac{dQ}{dt} / (P_{H_2O} \cdot S),$$

где  $P_{H_2O}$  – давление паров воды, напущенных в рабочую камеру;  $S$  – площадь поверхности образца. Таким образом, были получены значения константы скорости взаимодействия водяного пара с образцом графита ВТГР для различных температур образца (рис. 7).

Полученная зависимость может быть записана следующим образом:

$$(T) = 106 \left( \frac{\text{моль}}{\text{с} \cdot \text{Па} \cdot \text{м}} \right) \cdot \exp \left( - \frac{164(\text{кДж/моль})}{RT} \right).$$

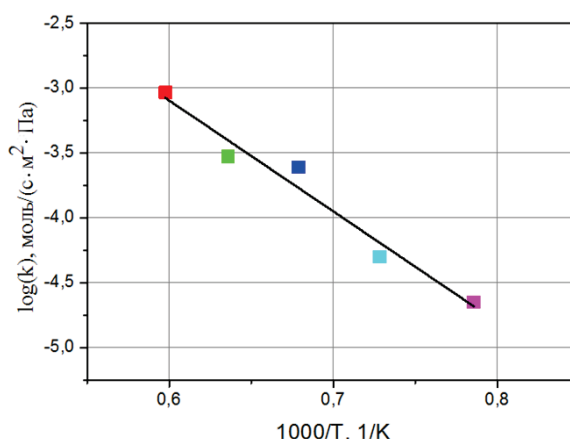


Рис. 7. Аррениусовская зависимость константы скорости взаимодействия  $H_2O$  с SiC-покрытием

Fig. 7. Arrhenius dependence of the rate constant for  $H_2O$  and SiC-coating interaction

### Микроструктура покрытия образца

Образец графита с SiC-покрытием после завершения коррозионного эксперимента в парах воды с давлением 100 Па может менять цвет поверхности (рис. 8) от исходного темно-серого к синеватому или фиолетовому. Такое изменение объясняется созданием на поверхности карбида кремния полупрозрачного слоя диоксида кремния, который ме-

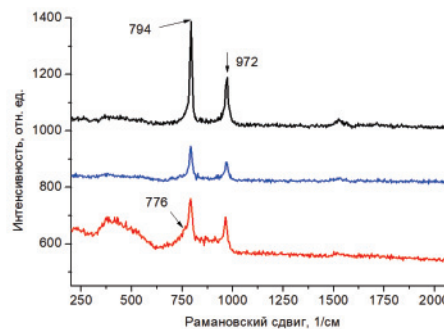
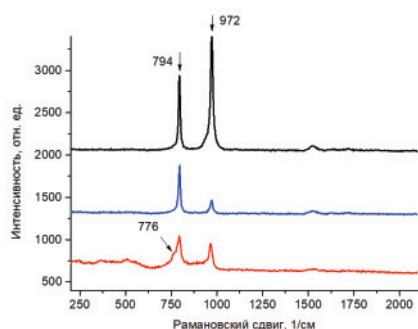
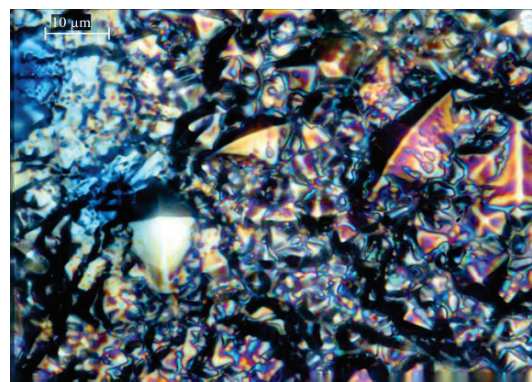
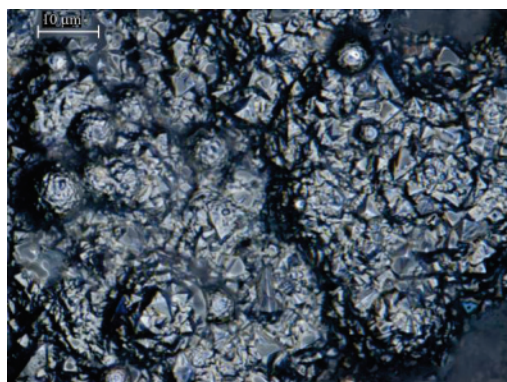


Рис. 8. Результаты микроструктурных исследований поверхности образца и Рамановские спектры (слева исходный, справа – после коррозии)

Fig. 8. Results of microstructural studies of the sample surface and the Raman spectra (on the left is original, on the right is after corrosion)

няет оттенок в зависимости от толщины пленки. Согласно литературным данным, красновато-фиолетовый цвет может соответствовать толщине  $\text{SiO}_2$ -пленки 100 нм [20, 31–33, 35].

В образце, помимо существенного изменения цветовых характеристик, наблюдаются и некоторые изменения в структуре. Рамановские пики исходного образца при 794 и 972  $\text{см}^{-1}$  соответствуют оптическим колебательным модам TO и LO кубической фазы карбида кремния 3C-SiC. В некоторых областях образца на спектрах наблюдается появление плеча в области 776  $\text{см}^{-1}$ , что характерно для TO мод гексагональных фаз 4H-SiC и 6H-SiC [36]. После коррозии заметно уменьшается интенсивность пиков 794 и 972  $\text{см}^{-1}$ , а в некоторых областях можно заметить их уширение, что может свидетельствовать о начале процесса аморфизации исходной кристаллической структуры SiC. Вес образца увеличивается примерно на 0,05–0,1 %, в отличие от 1–2 % убыли веса контрольного образца чистого графита после такого же эксперимента.

Таблица 2. Результаты ЭДС-анализа образца до и после коррозионных испытаний

Table 2. Results of the EDS analysis of the sample before and after corrosion tests

| Элемент<br>Element | До испытания, мас. %<br>Before tests, wt. % | После испытания, мас. %<br>After tests, wt. % |
|--------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Si                 | 60,47                                       | 60,10                                         |
| O                  | 0,30                                        | 23,17                                         |
| C                  | 39,23                                       | 16,73                                         |
| Всего/Total        | 100                                         | 100                                           |

Результаты ЭДС-анализа (энергодисперсионная спектроскопия) образца после пассивной коррозии свидетельствуют о присутствии на поверх-

ности значительных концентраций кислорода (табл. 2), что подтверждает наличие тонкого слоя (около 100 нм) аморфного стекла  $\text{SiO}_2$ .

### Заключение

Проведены эксперименты по высокотемпературной коррозии графита ВТГР с SiC-покрытием, и получены температурные зависимости изменения газового выхода коррозии для температур от 750 до 1400 °C при впрыске 100 Па водяного пара.

Установлено, что реакция SiC-покрытия графита с водяным паром при давлении 100 Па и выше происходит по пассивному (образующему дополнительный защитный слой диоксида кремния) механизму. Коррозия SiC в парах воды происходит при температурах 1100–1400 °C. В диапазоне температур 750–900 °C коррозия почти не регистрируется масс-анализатором.

Разработана модель для аналитического описания результатов экспериментов и рассчитаны скорости реакции окисления карбида кремния графита с парами воды при 1000–1400 °C.

Анализ изменения микроструктуры образцов после коррозионного эксперимента свидетельствует об образовании на поверхности карбида кремния защитного слоя  $\text{SiO}_2$ , характерного для механизма пассивного окисления SiC.

Результаты исследований позволяют заключить, что графит с SiC-покрытием обладает существенно более низкой скоростью коррозии (например, по сравнению с графитом, скорость коррозии отличается более чем в 1000 раз) и может быть применен для защиты топлива и графитовых узлов ВТГР.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках проекта № AP05132169.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tazhibaeva I.L., Kulsartov T.V., Kenzhin E.A. Material Science Activities for Fusion Reactors in Kazakhstan // Journal of the Nuclear Materials. – 2009. – V. 386–388. – P. 15–18.
2. Tritium migration in the materials proposed for fusion reactors:  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  and beryllium / T.V. Kulsartov, Yu.N. Gordienko, I.L. Tazhibayeva, E.A. Kenzhin, N.I. Barsukov, A.O. Sadvakassova, A.V. Kulsartova, Zh.A. Zaurbekova // Journal of the Nuclear Materials. – 2013. – V. 442. – P. 740–745.
3. Research of Reactor Radiation Influence upon Processes of Hydrogen Isotopes Interaction with Materials of the Fusion Facility / A.O. Sadvakassova, T.V. Kulsartov, I.L. Tazhibaeva, E.A. Kenzhin // Fusion Science and Technology. – 2011. – V. 60 (1T). – P. 9–15.
4. Status of design and experimental activity on module of lithium divertor of KTM tokamak / I. Lyubinski, A. Vertkov, M. Zharkov, V. Semenov, S. Mirnov, V. Lazarev, I. Tazhibayeva, G. Shapovalov, V. Dyachenko, A. Azizov, G. Mazzitelli, P. Agostini // Fusion Engineering and Design. – 2013. – V. 88. – Iss. 9–10. – P. 1862–1865.
5. Детритизация облученного бериллия различных марок тдс методом / Т.В. Кулсартов, И.Л. Тажибаева, Ю.Н. Гордиенко, Ж.А. Заурбекова, Е.Т. Коянбаев, И.М. Кукушкин, Е.А. Кенжин, А.О. Муканова, Д.С. Дюсамбаев, А.А. Шаймерденов, Л.В. Чекушина // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2014. – Т. 37. – Вып. 2. – С. 27–37.
6. Properties of tritium/helium release from hot isostatic pressed beryllium of various trademarks / L. Chekushina, D. Dyussambayev, A. Shaimerdenov, K. Tsuchiya, T. Takeuchi, H. Kawamura, T. Kulsartov // Journal of the Nuclear Materials. – 2014. – V. 452. – P. 41–45.
7. Investigation of hydrogen permeability through copper alloy CuCr1Zr0.1 and duplex structure Be-Cu / T.V. Kulsartov, Y.V. Chikhray, I.L. Tazhibaeva, V.P. Shestakov // Fusion Technology. – 1998. – V. 34. – Iss. 3. – Part 2. – P. 919–923.
8. Study of  $\text{Li}_2\text{TiO}_3+5 \text{ mol } \% \text{ TiO}_2$  lithium ceramics after long-term neutron irradiation / Y. Chikhray, V. Shestakov, O. Maksimkin, L. Turubarova, I. Osipov, T. Kulsartov, A. Kuykabayeva, I. Tazhibayeva, H. Kawamura, K. Tsuchiya // Journal of the Nuclear Materials. – 2009. – V. 386–388. – P. 286–289.
9. Mechanism of Tritium accumulation and release from  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  ceramics during long-term irradiation at WWR-K Reactor / I.L. Tazhibaeva, T.V. Kulsartov, I. Beckman, V.P. Shestakov, E.A. Kenzhin, E.V. Chikhray, H. Kawamura, A. Kiykabayeva, K. Tsuchiya // Journal of the Nuclear Materials. – 2011. – V. 411. – P. 121–126.
10. In-pile assemblies for investigation of tritium release from  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  lithium ceramic / V. Shestakov, I. Tazhibayeva, H. Kawamura, E.A. Kenzhin, E.V. Chikhray, T.V. Kulsartov, A. Kolbaen-

- kov, F. Arinkin, Sh. Kh. Gizatuln, P. Chakrov // Fusion Science and Technology. – 2005. – V. 47. – Iss. 4. – P. 1084–1088.
11. Investigation of the surface element composition influence on hydrogen permeability through vanadium alloy  $\text{VCr}_4\text{Ti}_4$  / I.V. Shkolnik, T.V. Kulsartov, I.L. Tazhibaeva, V.P. Shestakov // Fusion Technology. – 1998. – V. 34. – Iss. 3. – Part 2. – P. 868–871.
12. Mullite based oxidation protection for SiC/C composites in air at temperature up to 1900 K / H. Fritze, J. Jolie, T. Witke, C. Ruscher, S. Weber, S. Scherrer et al. // J. Eur. Ceram. Soc. – 1998. – V. 18. – № 16. – P. 2351–2364.
13. Huang J.F., Zeng X.R., Li H.J. Mullite- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC oxidation protective coating for C/C composites // Carbon. – 2003. – V. 41. – № 14. – P. 2825–2829.
14. Создание труб-оболочек твэлов из композиционных материалов на основе карбида кремния / Ф. Макаров, А. Пономаренко, Р. Захаров, И. Дзюбинский, С. Иванов, А. Глебов, М. Лебедев // Наноиндустрия. – 2017. – Т. 73. – № 3. – С. 60–67.
15. Thermodynamic Analysis of Behavior of HTGR Fuel and Fission Products under Accidental Air or Water Ingress Conditions / K. Minato, K. Fukuda // Proc. IAEA Technical Committee Mtg. on Response of Fuel, Fuel Elements and Gas-cooled Reactor Cores under Accidental Air or Water Ingress Conditions, IAEA-TEC-DOC-784. – Beijing, China, 1995. – P. 86–91.
16. Действие облучения на графит ядерных реакторов / В.В. Гончаров, Н.С. Бурдаков, Ю.С. Виргильев и др. – М.: Атомиздат, 1978. – 272 с.
17. Odeychuk M.P. Graphites and CCCM for nuclear reactor plants: Ukraine's experience // Proc. of International Conference on Ceramic Processing. – Mumbai, India, 2004. – P. 103–123.
18. Ferng Y.M., Chi C.W. CFD investigating the air ingress accident for a HTGR simulation of graphite corrosion oxidation // Nuclear Engineering and Design. – 2012. – V. 248. – P. 55–65.
19. Chikhray Y. et al. Corrosion test of HTGR graphite with SiC-coating // ANS Proceedings. International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR 2016). – Las Vegas, NV, November 6–10, 2016. – V. 1. – P. 572–577.
20. International Business Machines Corporation. Color Chart for Thermally Grown  $\text{SiO}_2$ . URL: [http://www.htelabs.com/appnotes/sio2\\_color\\_chart\\_thermal\\_silicon\\_dioxide.htm](http://www.htelabs.com/appnotes/sio2_color_chart_thermal_silicon_dioxide.htm) (дата обращения 25.03.2019).
21. Wang P., Yu X., Yu S. Progress of the study on corrosion behavior of graphite in HTGRs // Proc. of the 18<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering, ICONE18. – Xi'an, China, May 17–21, 2010. – V. 5. – P. 1–7.
22. Beyond the classical kinetic model for chronic graphite oxidation by moisture in high temperature gas-cooled reactors / C.I. Contescu, R.W. Mee, Y. Lee, J.D. Arregui-Mena, N.C. Gallego, T.D. Burchell, J.J. Kane, W.E. Windes // Carbon. – 2018. – V. 127. – P. 158–169.
23. Effective gaseous diffusion coefficients of select ultra-fine, super-fine and medium grain nuclear graphite / J.J. Kane, A.C. Matthews, C.J. Orme, C.I. Contescu, W.D. Swank, W.E. Windes // Carbon. – 2018. – V. 136. – P. 369–379.
24. Characterizing thermal-oxidation behaviors of nuclear graphite by combining  $\text{O}_2$  supply and micro surface area of graphite / Y. Zhou, Y. Dong, H. Yin, Z. Li, R. Yan, D. Li, Z. Zhang // Scientific Reports. – 2018. – V. 8:13400. DOI: 10.1038/s41598-018-31493-4.
25. Luo X., Jean-Charles R. Research of Oxidation Properties of Graphite Used in HTR-10. URL: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/43/024/43024028.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/024/43024028.pdf) (дата обращения 25.03.2019).
26. Thermal analysis of the oxidation of natural graphite-effect of particle size / W. Jiang, G. Nadeau, K. Zaghib, K. Kinoshita // Thermochimica Acta. – 2000. – V. 351. – № 1–2. – P. 85–93.
27. Excellent Feature of Japanese HTGR Technologies / T. Nishihaara, X. Yan, Y. Tachibana, T. Shibata, H. Ohashi, S. Kubo, Y. Inaba, S. Nakagawa, M. Goto, S. Ueta, N. Hirota, Y. Inagaki, K. Iigaki, S. Hamamoto, K. Kunitomi // JAEA-Technology 2018-004. – 2018. Japan Atomic Energy Agency. DOI: 10.11484/jaea-technology-2018-004.
28. Иванов М. Термическая деаэрация воды // Аква-Терм. – 2008. – Т. 41. – № 1. – С. 15–17.
29. Campbell P.A., Mitchell R.E. The Impact of the Distributions of Surface Oxides and their Migration on Characterization of the Heterogeneous Carbon-Oxygen Reaction // Combustion and Flame. – 2008. – V. 154. – P. 47–66.
30. О строении систем  $\text{SiC-B}_4\text{C-Me}^d\text{B}_2$  и перспективах создания композиционных керамических материалов на их основе / С.С. Орданьян, Д.Д. Несмелов, Д.П. Данилович, Ю.П. Удалов // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. – 2016. – Т. 4. – С. 41–50.
31. Ларионов Н.В. Покрытия из карбида кремния, полученные пиролизом монометилсилана, на реакционно-связанном карбиде кремния // Информационно-технологический вестник. – 2018. – № 1. – С. 127–136.
32. Влияние воздействия высокоскоростного потока азота на структуру и химический состав высокотемпературного покрытия на композиционном SiC-материале / Б.Е. Жестков, М.Л. Ваганова, Ю.Е. Лебедева, О.Ю. Сорокин, П.Н. Медведев // Теплофизика высоких температур. – 2018. – Т. 56. – № 3. – С. 395–398.
33. Шикунов С.Л., Курлов В.Н. Получение композиционных материалов на основе карбида кремния силицированием углеродных матриц // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87. – № 12. – С. 1871–1878.
34. Исследование износостойкости композиционного керамического материала системы TiC-SiC, полученного плазменно-исковым спеканием / М.Н. Каченюк, О.В. Сомов, Н.Б. Асташина, К.Э. Андраковская, Н.В. Морозова // Электронная обработка материалов. – 2016. – Т. 52. – № 6. – С. 19–24.
35. Investigation of the Oxidative Resistance of High-Temperature Coating on a SiC Material under Exposure to High-Enthalpy Flow / E.N. Kablov, B.E. Zhestkov, D.V. Grashchenkov, O.Yu. Sorokin, Yu.E. Lebedeva, M.L. Vaganova // High Temperature. – 2017. – V. 55. – № 6. – P. 873–879.
36. Optical spectroscopy study of damage induced in 4H-SiC by swift heavy ion irradiation / S. Sorieul, X. Kerbiriou, J.-M. Costantini, L. Gosmain, G. Calas, C. Trautmann // J. Phys.: Condens. Matter. – 2012. – V. 24. – Article № 125801 (7 p.).

Поступила 03.04.2019 г.

#### **Информация об авторах**

**Аскербек С.К.**, младший научный сотрудник лаборатории конструкционных материалов для ядерно-энергетических установок НИИ «Экспериментальной и теоретической физики» Казахского Национального Университета им. аль-Фараби.

**Чихрай Е.В.**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории конструкционных материалов для ядерно-энергетических установок НИИ «Экспериментальной и теоретической физики» Казахского Национального Университета им. аль-Фараби.

**Понкратов Ю.В.**, научный сотрудник лаборатории внутриканальных испытаний Института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

**Никитенков Н.Н.**, доктор физико-математических наук, профессор отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 620.19, 621.039.586, 621.039.524.2.034.3

## RESEARCH OF HIGH-TEMPERATURE CORROSION OF SiC-COATING ON GRAPHITE

Saulet K. Askerbekov<sup>1</sup>,  
askerbekov@physics.kz

Evgeniy V. Chikhray<sup>1</sup>,  
chikhray@physics.kz

Yuriy V. Ponkratov<sup>2</sup>,  
ponkratov@nnc.kz

Nikolay N. Nikitenkov<sup>3</sup>,  
nikitenkov@tpu.ru

<sup>1</sup> Kazakh National University named after Al-Farabi,  
71, Al-Farabi Avenue, Almaty, 050040, Kazakhstan.

<sup>2</sup> National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan,  
10, Krasnoarmeyskaya street, Kurchatov, 071100, Kazakhstan.

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of this work is caused by possible prospect of creating a Kazakhstani high-temperature gas-cooled reactor, in which a number of new materials science solutions will be applied regarding the graphite matrix and fuel cells. Silicon carbide (SiC) coatings will be used on reactor fuel cells, in which graphite is the main constituent material.

**The aim** of the research is to evaluate the corrosion rate of reactor graphite with SiC-coating in the temperature range from 750 to 1400 °C at the initial pressure of water vapor in the chamber 100 Pa.

**Object:** isotropic fine-grained graphite of IG-110 brand with a protective SiC-coating thickness of 200 microns.

**Methods:** programmable thermal desorption of samples in the presence of water vapor, mass spectrometric recording of the gas composition in the working chamber, microstructural studies, Raman spectroscopy, energy-dispersed X-ray spectroscopy.

**Results.** It is shown that at pressures of water vapor of 100 Pa, the SiC-coating interacts with steam through a passive (forming an additional protective layer of amorphous silicon dioxide) mechanism. Corrosion of SiC in water vapor at temperatures of 1100–1400 °C occurs by orders of magnitude more intense than at 750–900 °C. A model for analytical description of the experimental results was developed and the parameters of the rate constant for water vapor interaction with a SiC-coating were calculated for sample temperatures of 1400, 1300, 1200, 1100, and 1000 °C. Microstructural studies of the samples before and after corrosion tests were carried out, which showed that a protective SiO<sub>2</sub> film is formed on the surface with a SiC carbide coating during passive corrosion. The research results allow us to conclude that the prototype of a fuel with a SiC-coating has improved anti-corrosion properties and can be successfully used to reduce carbon chemical activity in fuel cells and fuel assemblies of high-temperature gas-cooled reactor without deteriorating their mechanical and temperature properties.

### Key words:

Reactor graphite, SiC-coating, HTGR, corrosion, water vapor.

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan in the framework of the project No. AP05132169.

### REFERENCES

1. Tazhibayeva I.L., Kulsartov T.V., Kenzhin E.A. Material Science Activities for Fusion Reactors in Kazakhstan. *Journal of the Nuclear Materials*, 2009, vol. 386–388, pp. 15–18.
2. Kulsartov T.V., Gordienko Yu.N., Tazhibayeva I.L., Kenzhin E.A., Barsukov N.I., Sadvakasova A.O., Kulsartova A.V., Zaurbekova Zh.A. Tritium migration in the materials proposed for fusion reactors: Li<sub>2</sub>TiO<sub>3</sub> and beryllium. *Journal of the Nuclear Materials*, 2013, vol. 442, pp. 740–745.
3. Sadvakassova A.O., Kulsartov T.V., Tazhibayeva I.L., Kenzhin E.A. Research of Reactor Radiation Influence upon Processes of Hydrogen Isotopes Interaction with Materials of the Fusion Facility. *Fusion Science and Technology*, 2011, vol. 60, no. 1, pp. 9–15.
4. Lyublinski I., Vertkov A., Zharkov M., Semenov V., Mirnov S., Lazarev V., Tazhibayeva I., Shapovalov G., Dyachenko V., Azizov A., Mazzitelli G., Agostini P. Status of design and experimental activity on module of lithium divertor of KTM tokamak. *Fusion Engineering and Design*, 2013, vol. 88, no. 9–10, pp. 1862–1865.
5. Kulsartov T.V., Tazhibayeva I.L., Gordiyenko Yu.N., Zaurbekova Zh.A., Koyanbayev E.T., Kukushkin I.M., Kenzhin E.A., Mukanova A.O., Dyusambayev D.S., Shaymerdenov A.A., Chekushina L.V. Detritization of irradiated beryllium of various grades using tds method. *PAS&T/TF*, 2014, vol. 37, no. 2, pp. 27–37. In Rus.
6. Chekushina L., Dyusambayev D., Shaimerdenov A., Tsuchiya K., Takeuchi T., Kawamura H., Kulsartov T. Properties of tritium/helium release from hot isostatic pressed beryllium of various trademarks. *Journal of the Nuclear Materials*, 2014, vol. 452, pp. 41–45.
7. Kulsartov T.V., Chikhray Y.V., Tazhibayeva I.L., Shestakov V.P. Investigation of hydrogen permeability through copper alloy CuCr1Zr0.1 and duplex structure Be-Cu. *Fusion Technology*, 1998, vol. 34, no. 3, P. 2, pp. 919–923.
8. Chikhray Y., Shestakov V., Maksimkin O., Turubarova L., Osipov I., Kulsartov T., Kuykabayeva A., Tazhibayeva I., Kawamura H.,

- Tsuchiya K. Study of  $\text{Li}_2\text{TiO}_3+5 \text{ mol } \% \text{ TiO}_2$  lithium ceramics after long-term neutron irradiation. *Journal of the Nuclear Materials*, 2009, vol. 386–388, pp. 286–289.
9. Tazhibayeva I.L., Kulsartov T.V., Beckman I., Shestakov V.P., Kenzhin E.A., Chikhray E.V., Kawamura H., Kiykabaeva A., Tsuchiya K.. Mechanism of Tritium accumulation and release from  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  ceramics during long-term irradiation at WWR-K Reactor. *Journal of the Nuclear Materials*, 2011, vol. 411, pp. 121–126.
10. Shestakov V., Tazhibayeva I., Kawamura H., Kenzhin E.A., Chikhray E.V., Kulsartov T.V., Kolbaenkov A., Arinkin F., Gizatuln Sh.Kh., Chakrov P. In-pile assemblies for investigation of tritium release from  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  lithium ceramic. *Fusion Science and Technology*, 2005, vol. 47, no. 4, pp. 1084–1088.
11. Shkolnik I.V., Kulsartov T.V., Tazhibayeva I.L., Shestakov V.P. Investigation of the surface element composition influence on hydrogen permeability through vanadium alloy  $\text{VCr}_4\text{Ti}_4$ . *Fusion Technology*, 1998, vol. 34, no. 3, part 2, pp. 868–871.
12. Fritze H., Jolie J., Witke T., Ruscher C., Weber S., Scherrer S. Mullite based oxidation protection for SiC/C composites in air at temperature up to 1900 K. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 1998, vol. 18, no. 16, pp. 2351–2364.
13. Huang J.F., Zeng X.R., Li H.J. Mullite- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -SiC oxidation protective coating for C/C composites. *Carbon*, 2003, vol. 41, no. 14, pp. 2825–2829.
14. Makarov F., Ponomarenko A., Zakharov R., Dzyubinskiy I., Ivanov S., Glebov A., Lebedev M. Creating shells of fuel rods made of composite materials based on silicon carbide. *Nanoindustry*, 2017, vol. 73, no. 3, pp. 60–67. In Rus.
15. Minato K., Fukuda K.. Thermodynamic Analysis of Behavior of HTGR Fuel and Fission Products under Accidental Air or Water Ingress Conditions. *Proc. IAEA Technical Committee Mtg. on Response of Fuel, Fuel Elements and Gas-cooled Reactor Cores under Accidental Air or Water Ingress Conditions*, IAEA-TECDOC-784. Beijing, China, 1995, pp. 86–91.
16. Goncharov V.V., Burdakov N.S., Virgilyev Yu.S. *Deystvie oblucheniya na grafit yadernykh reaktorov* [Irradiation effect on graphite of nuclear reactors]. Moscow, Atomizdat Publ., 1978. 272 p.
17. Odeychuk M.P. Graphites and CCCM for nuclear reactor plants: Ukraine's experience. *Proc. of International Conference on Ceramic Processing*. Mumbai, India, 2004. pp. 103–123.
18. Ferng Y.M., Chi C.W. CFD investigating the air ingress accident for a HTGR simulation of graphite corrosion oxidation. *Nuclear Engineering and Design*, 2012, vol. 248, pp. 55–65.
19. Chikhray Y. Corrosion test of HTGR graphite with SiC coating. *ANS Proceedings, International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology (HTR 2016)*. Las Vegas, NV, November 6–10, 2016. Vol. 1, pp. 572–577.
20. International Business Machines Corporation. Color Chart for Thermally Grown  $\text{SiO}_2$ . Available at: [http://www.htelabs.com/appnotes/sio2\\_color\\_chart\\_thermal\\_silicon\\_dioxide.htm](http://www.htelabs.com/appnotes/sio2_color_chart_thermal_silicon_dioxide.htm) (accessed 25 March 2019).
21. Wang P., Yu X., Yu S. Progress of the study on corrosion behavior of graphite in HTGRs. *Proc. of the 18<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering*, ICONE18. Xi'an, China, May 17–21, 2010. Vol. 5, pp. 1–7.
22. Contescu C.I., Mee R.W., Lee Y., Arregui-Mena J.D., Gallego N.C., Burchell T.D., Kane J.J., Windes W.E. Beyond the classical kinetic model for chronic graphite oxidation by moisture in high temperature gas-cooled reactors. *Carbon*, 2018, vol. 127, pp. 158–169.
23. Kane J.J., Matthews A.C., Orme C.J., Contescu C.I., Swank W.D., Windes W.E. Effective gaseous diffusion coefficients of select ultra-fine, super-fine and medium grain nuclear graphite. *Carbon*, 2018, vol. 136, pp. 369–379.
24. Zhou Y., Dong Y., Yin H., Li Z., Yan R., Li D., Zhang Z. Characterizing thermal-oxidation behaviors of nuclear graphite by combining  $\text{O}_2$  supply and micro surface area of graphite. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8:13400. DOI: 10.1038/s41598-018-31493-4.
25. Luo X., Jean-Charles R. *Research of Oxidation Properties of Graphite Used in HTR10*. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/43/024/43024028.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/024/43024028.pdf) (accessed 25 March 2019).
26. Jiang W., Nadeau G., Zaghbi K., Kinoshita K. Thermal analysis of the oxidation of natural graphite – effect of particle size. *Thermochimica Acta*, 2000, vol. 351, no. 1–2, pp. 85–93.
27. Nishihara T., Yan X., Tachibana Y., Shibata T., Ohashi H., Kubo S., Inaba Y., Nakagawa S., Goto M., Ueta S., Hirota N., Inagaki Y., Iigaki K., Hamamoto S., Kunitomi K. Excellent Feature of Japanese HTGR Technologies. *JAEA Technology 2018-004*. 2018, Japan Atomic Energy Agency. DOI: 10.11484/jaea-technology-2018-004.
28. Ivanov V. Thermal water deaeration. *Aqua-Therm*, 2008, vol. 41, no. 1, pp. 15–17. In Rus.
29. Campbell P.A., Mitchell R.E. The Impact of the Distributions of Surface Oxides and their Migration on Characterization of the Heterogeneous Carbon-Oxygen Reaction. *Combustion and Flame*, 2008, vol. 154, pp. 47–66.
30. Ordanyan S.S., Nesmelov D.D., Danilovich D.P., Udalov Yu.P. On constructing the SiC-B4C-MedB2 systems and the prospects for creating composite ceramic materials based on them. *News of universities. Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2016, vol. 4, pp. 41–50. In Rus.
31. Larionov N.V. Silicon carbide coatings obtained by pyrolysis of monomethylsilane on reaction-bonded silicon carbide. *Information and Technological Journal*, 2018, no. 1, pp. 127–136. In Rus.
32. Zhestkov B.E., Vaganova M.L., Lebedeva Yu.E., Sorokin O.Yu., Medvedev P.N. The effect of high-speed nitrogen flow on the structure and chemical composition of high-temperature coating on composite SiC-material. *Thermal physics of high temperatures*, 2018, vol. 56, no. 3, pp. 395–398. In Rus.
33. Shikunov S.L., Kurlov V.N. Production of composite materials based on silicon carbide by siliconizing carbon matrices. *Journal of Technical Physics*, 2017, vol. 87, no. 12, pp. 1871–1878. In Rus.
34. Kachenyuk M.N., Somov O.V., Astashina N.B., Andrakovskaya K.E., Morozova N.V. Investigation of wear resistance of composite ceramic material of the TiC-SiC system, obtained by plasma-spark sintering. *Electronic material processing*, 2016, vol. 52, no. 6, pp. 19–24. In Rus.
35. Kablov E.N., Zhestkov B.E., Grashchenkov D.V., Sorokin O.Yu., Lebedeva Yu.E., Vaganova M.L. Investigation of the Oxidative Resistance of High-Temperature Coating on a SiC Material under Exposure to High-Enthalpy Flow. *High Temperature*, 2017, vol. 55, no. 6, pp. 873–879.
36. Sorieul S., Kerbirou X., Costantini J.-M., Gosmain L., Calas G., Trautmann C. Optical spectroscopy study of damage induced in 4H-SiC by swift heavy ion irradiation. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2012, vol. 24, Article no. 125801 (7 p).

Received: 3 April 2019.

# Information about the authors

**Saulet K. Askerbekov**, junior researcher, Kazakh National University named after Al-Farabi.

**Evgeniy V. Chikhray**, Cand. Sc., leading researcher, Kazakh National University named after Al-Farabi.

**Yuriy V. Ponkratov**, researcher, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

**Nikolay N. Nikitenkov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.807

## К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ И ПЫЛИ С ЦЕЛЬЮ ВОЗМОЖНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ

Ганова Светлана Дмитриевна<sup>1</sup>,  
ganova\_s@mail.ru

Скопинцева Ольга Васильевна<sup>1</sup>,  
skopintseva54@mail.ru

Исаев Олег Николаевич<sup>1</sup>,  
isaevoleg75@mail.ru

<sup>1</sup> Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе,  
Россия, 117997, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23.

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью обеспечения безопасности горных работ на высокогазоносных выбросоопасных угольных пластах, опасных по пыли. Это направление связано с исследованием всего состава газов угленосных отложений и, в частности, высших углеводородов, и оценкой их роли в возникновении взрывопожароопасных ситуаций и внезапных выбросов угля и газа в горные выработки. Определение количественного состава углеводородных газов является необходимой составляющей в процессе выявления степени выбросоопасности пластов, а также определения рациональных параметров обработки угольных пластов с целью снижения их газоносности и пылеобразующей способности для уменьшения риска возникновения пожаровзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах.

**Цель:** изучить состав и количество углеводородных газов высокогазоносных выбросоопасных угольных пластов, опасных по пыли; определить интервал температур при термодегазации для полного извлечения сорбированных углеводородов; сравнить полученные данные по углеводородам углей и пыли; оценить роль сорбированных углеводородов угольной пыли в создании пылевзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах; рассчитать количество высших углеводородов в выбросоопасных угольных пластах.

**Методы:** анализ отечественного и зарубежного опыта; сбор, систематизация и анализ имеющихся в литературных и фондовых источниках сведений по количеству и составу высших углеводородных газов угольных пластов; газовая хроматография с помощью хроматографа «Кристалл 5000.1», термодегазация проб угля и угольной пыли на газовом хроматографе «М-3700», ситовый анализ фракционного состава угольной пыли; методы математической статистики для оценки достоверности полученных результатов по количеству высших углеводородных газов в угле и угольной пыли.

**Результаты.** Установлено, что основное количество сорбированных углеводородов выделяется из угля при термической дегазации в интервале температур 200–250 °С. Содержание предельных углеводородов от метана до гексана в газах, выделенных из углей средней стадии метаморфизма и угольной пыли, составило 13,4–29,1 см<sup>3</sup>/кг угля, пыли. Определено обогащение десорбированных углеводородов тяжелыми углеводородами, причем в основном преобладают пропан (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) и бутан (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), выделение которых в шахтную атмосферу может привести к снижению температуры воспламенения пылегазовоздушной смеси, что представляет потенциальную опасность возникновения пожаровзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах. Полученные данные по высшим углеводородам могут быть использованы для возможного прогнозирования степени выбросоопасности пластов.

### Ключевые слова:

Угольный массив, угольная пыль, остаточные углеводороды углей и пыли, высшие углеводороды, термическая дегазация, выбросоопасность пластов, пожаровзрывоопасность в угольных шахтах.

### Введение

Анализ аварийности и травматизма на угольных шахтах России показывает, что за последние годы на высокопроизводительных шахтах России происходили катастрофические взрывы метана и угольной пыли, сопровождавшиеся экзогенными пожарами. При этом аварии носили комплексный характер, т. е. в них реализовывалось несколько опасных факторов: газ, пыль, внезапные выбросы угля и газа, пожары, тогда как в системе профилактики взрывов основной акцент сделан на метан [1–9].

Значительное количество работ [10–13] опубликовано по сорбции углеводородов в связи с определением метаноемкости углей и гидровоздействием на угольные пласты. Однако основное внимание уделяется метану, и данные по тяжелым углеводородам практически не приводятся.

В решении проблемы борьбы со взрывами метана и угольной пыли на больших глубинах выбросо-

опасных пластов остаются неопределенными механизмы газодинамических явлений, генерации углеводородов угольным веществом, образования и самовоспламенения взрывоопасной среды в горных выработках. В данной статье делаются попытки найти общие признаки в генерации высших углеводородов высокогазоносными угольными пластами и внезапными выбросами угля и газа. С позиций наличия высших углеводородных газов в угольной пыли дается оценка роли этих газов в возникновении пожаровзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах.

### Исследование состава и количества углеводородных газов в угле и пыли высокогазоносных пластов

Как известно, ископаемые угли относятся к своеобразному классу природных сорбентов, которые получили название «молекулярных сит». Для них характерна пористая структура с преоблада-

нием главным образом микропор диаметром 1,0–1,5 нм. Поэтому скорость свободной десорбции из угля последовательно снижается от  $\text{CH}_4$  к его гомологам, т. к. диаметр молекул в ряде  $\text{CH}_4$ – $\text{C}_5\text{H}_{12}$  возрастает от 0,42 до 0,8 нм. Это объясняется двумя процессами: возрастанием энергий дисперсионного взаимодействия молекул гомологов метана с молекулами сорбента при объемном заполнении микропор и проявлением молекулярно-ситового эффекта в микропорах угля.

Высшие гомологи метана в основном начинают выделяться из угля после его измельчения и нагрева в вакууме. При вскрытии угольных пластов и снижении давления происходит последовательное выделение углеводородов из углей в соответствии с их сорбционными свойствами. Метан, как наиболее подвижный компонент, опережает другие, более тяжелые углеводороды (УВ), которые начинают выделяться после истечения из пласта основной доли метана. Этим можно объяснить, что в свободно выделяемых из углей газах наблюдаются низкие концентрации тяжелых УВ, которые остаются в угле как трудно выделяемые. Поэтому при прочих равных условиях процентное содержание высших углеводородных газов, выделяющихся в выработку или скважину, зависит от многих факторов, и в первую очередь от степени перематости угольного массива.

В работе Е.С. Розанцева и Н.П. Таран [14] представлены результаты исследований по углям 10 шахт Кузбасса с выходом летучих веществ от 7 до 42 %, выполнен анализ 130 проб газа по определению состава газа, выделяющегося в скважины, пробуренные в пласты. Установлено, что на современных глубинах разработки в угольных пластах на всех стадиях метаморфизма может содержаться самое разнообразное количество высших углеводородов – от 0,0001 до 1,8  $\text{см}^3/\text{г}$  горючей массы. Результаты их опытов показали, что перематые угли поглощают в 1,7 раза больше высших углеводородов, чем крепкие ненарушенные угли. Сорбционная емкость углей по отношению к высшим углеводородам увеличивается по мере уменьшения крепости, а следовательно, по мере увеличения степени тектонической препарации углей. По данным этих авторов с возрастанием выбросоопасности пласта и частоты проявления внезапных выбросов повышается и содержание в угле высших углеводородов (до 1,8  $\text{м}^3/\text{т}$  горючей массы). Пласты, практически невыбросоопасные, содержат высших углеводородов до 0,001  $\text{м}^3/\text{т}$  горючей массы; при содержании более 0,01  $\text{м}^3/\text{т}$  г.м. пласты опасны, а при содержании от 0,004 до 0,01  $\text{м}^3/\text{т}$  г.м. угольные пласты являются переходными от опасных к неопасным [14].

В рамках экологизации процессов горного производства [15–17] на кафедре техносферной безопасности Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе были выполнены исследования состава и количества сорбированных углеводородов угольных пластов и пыли для условий шахты «Осинниковская», (уголь марки

Ж): Е-1, Е-5, К-1, К-5, угольная пыль пласта Е-5 [18]. На шахте отрабатываются три свиты пластов: Елбанская, Кандалепская и Полкашкинская (15 пластов угля марки «Ж»). Мощность пластов в пределах от 0,8 до 3,2 м. Шахта относится к опасной по внезапным выбросам (К-1, Е-5) и горным ударам, опасной по суфлярным выделениям метана. Все пласты относятся к опасным по пыли. Выход летучих веществ изменяется от 29,5 до 36,2 %, нижний предел взрывчатости пыли составляет от 30 до 45  $\text{г}/\text{м}^3$ , удельное пылевыведение – от 295 до 1300  $\text{г}/\text{т}$ .

Результаты исследований сорбированных углеводородов, извлеченных из углей и угольной пыли, представлены в таблице. Основное количество сорбированных углеводородов выделяется из угля при термической дегазации в интервале температур 200–250 °С. При дальнейшем повышении температуры их «выход» снижается, что позволяет говорить о практически полном извлечении сорбированных углеводородов при температуре воздействия на уголь в интервале 200...250 °С. Содержание предельных углеводородов от метана до гексана в газах, выделенных из углей средней стадии метаморфизма и угольной пыли, составило 13,4...29,1  $\text{см}^3/\text{кг}$  угля, пыли. Определено обогащение десорбированных углеводородов тяжелыми углеводородами, причем в основном преобладают пропан ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) и бутан ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ) [18].

Угольная пыль содержит больше углеводородов  $\text{C}_4$ – $\text{C}_6$  по сравнению с углеводородами, выделенными из углей –  $\text{C}_3$ – $\text{C}_4$ . Содержание предельных углеводородов от пропана до гексана в сумме углеводородов, извлеченных из углей при термодегазации с температурой 250 °С, варьирует в пределах 80–87 %, в угольной пыли доля извлеченных предельных углеводородов от пропана до гексана достигает 91 %.

Если сравнить две строчки по углю и по пыли пласта Е-5 (таблица), то можно видеть, что уголь содержит углеводороды преимущественно с диаметром молекул 0,632 нм, а пыль – с диаметром молекул 0,707–0,839 нм. Эти данные хорошо согласуются с данными Е.С. Розанцева и Н.П. Таран о наличии большого количества высших углеводородов в перематых пачках угольных пластов при тектонической препарации угля. Все это еще требует своего объяснения, но можно предположить, что наличие большого количества высших углеводородов в перематых пачках угольных пластов обусловлено образованием либо дополнительного количества высших углеводородов, которые этим же углем и сорбируются, либо повышением сорбционной способности угля, а в нашем случае и угольной пыли, по отношению к высшим углеводородам.

По данным таблицы количество высших углеводородов для угля пластов Е-5, Е-1 и К-5 равно 13,55; 25,15 и 12,27  $\text{см}^3/\text{кг}$  или 0,0135; 0,025 и 0,0127  $\text{м}^3/\text{т}$ . По предложенной Е.С. Розанцевым и Н.П. Таран оценке все три пласта относятся к выбросоопасным, так как содержат высших углеводородов более 0,01  $\text{м}^3/\text{т}$ .

**Таблица.** Основные свойства, количество и состав сорбированных углеводородов, извлеченных из угля и угольной пыли методом термодезгазации

**Table.** Main properties, amount and composition of sorbed hydrocarbons extracted from coal and coal dust by thermodegisation

| Вещество, параметры<br>Substance, options                                                                                                                                                                                                   | Углеводороды /Hydrocarbons |                               |                               |                               |                               |                                |                               |                                |                                | Σ*   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|
|                                                                                                                                                                                                                                             | CH <sub>4</sub>            | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> |      |
| Эффективный диаметр молекулы, нм<br>Effective diameter of the molecule, nm                                                                                                                                                                  | 0,414                      | 0,537                         | 0,495                         | 0,632                         | 0,599                         | 0,707                          | 0,674                         | 0,780                          | 0,839                          | –    |
| Относительная молекулярная масса<br>Relative molecular weight                                                                                                                                                                               | 16,043                     | 30,070                        | 28,054                        | 44,097                        | 42,081                        | 58,124                         | 56,100                        | 72,147                         | 86,173                         | –    |
| Плотность, кг/нор. м <sup>3</sup><br>Density, kg/normal m <sup>3</sup>                                                                                                                                                                      | 0,715                      | 1,357                         | 1,260                         | 2,019                         | 1,915                         | 2,703                          | 2,668                         | 3,172                          | 3,638                          | –    |
| Пределы взрываемости, об. %<br>Explosive limits, vol. %                                                                                                                                                                                     | 5,0–14,0                   | 3,2–12,5                      | 2,75–28,6                     | 2,4–9,5                       | 2,1–14,5                      | 1,9–8,4                        | 1,6–12,3                      | 1,4–7,8                        | 1,25–6,9                       | –    |
| Количество адсорбированного газа из угля пласта Е-1, см <sup>3</sup> /кг; содержание в газовой смеси, об. %<br>Amount of adsorbed gas from the coal of the reservoir Е-1, cm <sup>3</sup> /kg; content in gas mixture, vol. %               | 3,9<br>13,4                | 1,25<br>4,3                   | 0,71<br>2,4                   | 6,59<br>22,7                  | 0,7<br>2,4                    | 9,4<br>32,4                    | Отсут-<br>ствуют              | 4,95<br>17,0                   | 1,55<br>5,3                    | 29,1 |
| Количество адсорбированного газа из угля пласта Е-5, см <sup>3</sup> /кг; содержание в газовой смеси, об. %<br>Amount of adsorbed gas from the coal of the Е-5 formation, cm <sup>3</sup> /kg; content in gas mixture, vol. %               | 2,25<br>14,3               | 0,59<br>3,7                   | 0,29<br>1,8                   | 7,03<br>44,6                  | 0,45<br>2,9                   | 4,66<br>29,5                   | Отсут-<br>ствуют              | 0,21<br>1,3                    | 0,29<br>1,8                    | 15,8 |
| Количество адсорбированного газа из угля пласта К-5, см <sup>3</sup> /кг; содержание в газовой смеси, об. %<br>Amount of adsorbed gas from the coal of the К-5 formation, cm <sup>3</sup> /kg; content in gas mixture, vol. %               | 1,13<br>8,5                | 0,37<br>2,8                   | 0,25<br>1,9                   | 2,94<br>22,0                  | Отсут-<br>ствуют              | 4,87<br>36,5                   | 0,85<br>6,4                   | 2,49<br>18,7                   | 0,45<br>3,4                    | 13,4 |
| Количество адсорбированного газа из угольной пыли пласта Е-5, см <sup>3</sup> /кг; содержание в газовой смеси, об. %<br>Amount of adsorbed gas from the coal dust of the Е-5 formation, cm <sup>3</sup> /kg; content in gas mixture, vol. % | 1,31<br>6,7                | 0,29<br>1,5                   | 0,21<br>1,1                   | 1,45<br>7,4                   | 0,11<br>0,6                   | 9,74<br>50,0                   | 0,09<br>0,5                   | 3,96<br>20,3                   | 2,31<br>11,9                   | 19,5 |
| Температура самовоспламенения углеводородов угля, °С<br>Temperature of coal hydrocarbon self-ignition, °C                                                                                                                                   | 595                        | 515                           | 435                           | 470                           | 448                           | 405                            | 366                           | 286                            | 233                            | –    |
| Удельная теплота сгорания углеводородов угля, МДж/нор. м <sup>3</sup><br>Specific heat of coal hydrocarbon combustion, MJ/Nom. m <sup>3</sup>                                                                                               | 39,8                       | 70,3                          | 87,7                          | 101,2                         | 118,4                         | 133,4                          | 152,3                         | 169,3                          | 187,4                          | –    |

Примечание: Σ\* – сумма предельных углеводородов.

Note: Σ\* is the sum of the ultimate hydrocarbons.

### Роль остаточных углеводородов угольной пыли в создании пожаровзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах

О роли остаточных углеводородов углей в создании пожаровзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах отмечалось в [18], но о роли остаточных углеводородов угольной пыли в создании пожаровзрывоопасных ситуаций данные отсутствуют, нет и данных о наличии остаточных углеводородов в угольной пыли [19]. Потенциальная опасность остаточных углеводородов углей и угольной пыли, обогащенных тяжелыми углеводородами, определяется следующим. Известно, что температура воспламенения и концентрационные пределы взрываемости тяжелых углеводородов меньше, а теплотворная способность больше, чем у метана. Именно в этом таится потенциальная опасность остаточных углеводородов, так как тепловое воздей-

ствие на уголь происходит во многих процессах отделения угля от массива и способствует выделению остаточных углеводородов в шахтную атмосферу не только из угля, но и из угольной пыли.

Данные хроматографического анализа остаточных углеводородов угольной пыли показывают, что в целом остаточные углеводороды угольной пыли наследуют остаточные углеводороды углей, из которых формируется угольная пыль. Учитывая результаты выполненных исследований остаточных углеводородов угольной пыли и данные по остаточным углеводородам углей [20], можно предположить следующую последовательность развития пожаровзрывоопасных процессов в угольных шахтах:

- выделение остаточных углеводородов из углей и образование угольной пыли в процессе добычи угля;

- воспламенение остаточных углеводородов, выделившихся из угля, и нагревание угольной пыли;
- выделение остаточных углеводородов из угольной пыли, их воспламенение и нагрев пыли до температуры протекания процессов пиролиза угольного вещества пыли;
- пиролиз угольного вещества пыли с выделением горючих веществ;
- воспламенение выделившихся горючих веществ и разогрев твердого угольного вещества пыли;
- выгорание углеродных частиц пыли.

Вся предполагаемая последовательность процессов и приводит к возникновению пожаровзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах.

### Заключение

Высшие углеводороды наряду с метаном входят в состав газов угленосных отложений. В процессе углефикации генерируется огромное количество газов, преимущественно углеводородов. Основное внимание ученых и специалистов уделяется метану. Масштабные катастрофы в угольных шахтах за последние годы в результате взрывов пылеметановоздушных смесей показали несовершенство существующей концепции обеспечения взрывобезопасности горных работ на высокогазоносных угольных пластах и требуют фундаментальных исследований для ее усовершенствования. Нам представляется целесообразным исследование вопросов, связанных с наличием высших углеводородов в высокогазоносных пластах, опасных по пыли, внезапным выбросам, для оценки их роли в возникновении внезапных выбросов угля, породы и газа и пожаровзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах.

### Выводы

1. Основное количество сорбированных углеводородов выделяется из угля при термической де-

газации в интервале температур 200–250 °С. При дальнейшем повышении температуры их «выход» снижается, что позволяет говорить о практически полном извлечении сорбированных углеводородов при температуре воздействия на уголь в интервале 200–250 °С.

2. Содержание предельных углеводородов от метана до гексана в газах, выделенных из углей средней стадии метаморфизма и угольной пыли, составило 13,4–29,1 см<sup>3</sup>/кг угля, пыли. Определено обогащение десорбированных углеводородов тяжелыми углеводородами, причем в основном преобладают пропан (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) и бутан (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>).
3. Угольная пыль содержит больше углеводородов C<sub>4</sub>–C<sub>6</sub> по сравнению с углеводородами, выделенными из углей – C<sub>3</sub>–C<sub>4</sub>. Содержание предельных углеводородов от пропана до гексана в сумме углеводородов, извлеченных из углей при термодегазации с температурой 250 °С, варьирует в пределах 80–87 %, в угольной пыли доля извлеченных предельных углеводородов от пропана до гексана достигает 91 %.
4. Остаточные углеводороды угольной пыли в целом наследуют остаточные углеводороды углей, из которых формируется угольная пыль. Существенная обогащенность остаточных углеводородов углей и угольной пыли тяжелыми углеводородами и их выделение в шахтную атмосферу может привести к снижению температуры воспламенения пылегазовоздушной смеси. Это и представляет потенциальную опасность возникновения пожаровзрывоопасных ситуаций в угольных шахтах.
5. Количество высших углеводородов для угля пластов Е-5, Е-1 и К-5 равно 13,55; 25,15 и 12,27 см<sup>3</sup>/кг или 0,0135; 0,025 и 0,0127 м<sup>3</sup>/т. По предложенной Е.С. Розанцевым и Н.П. Таран оценке все три пласта относятся к выбросоопасным, так как содержат высших углеводородов более 0,01 м<sup>3</sup>/т.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yang Lei. A mixed element method for the desorption-diffusion-seepage model of gas flow in deformable coalbed methane reservoirs // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2014. – № 1. – P. 1–10.
2. Safety line method for the prediction of deep coal-seam gas pressure and its application in coal mines / L. Wang, Y.-P. Cheng, P.-K. Guo, W. Li // *Safety Science*. – 2012. – V. 50. – № 3. – P. 523–529.
3. Coal mine methane: a review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction / C.O. Karacan, F.A. Ruiz, M. Coté, S. Phipps // *International Journal of Coal Geology*. – 2011. – V. 86. – № 2. – P. 121–156.
4. Risk Analysis of Dust Explosion Scenarios Using Bayesian Networks / Z. Yuan, N. Khakzad, F. Khan, P. Amyotte // *Risk Analysis*. – 2015. – V. 35. – № 2. – P. 278–291.
5. Баловцев С.В. Оценка аэрологического риска аварий на выемочных участках угольных шахт, опасных по взрывам газа и пыли // *Горный журнал*. – 2015. – № 5. – С. 91–93.
6. Поздняков Г.А., Голоскоков Е.И., Закутский Е.Л. Проблемы и перспективы развития способа мониторинга взрывобезопасности горных выработок // *Горная промышленность*. – 2016. – № 4. – С. 66–67.
7. Estimation of the effective thermal properties of cracked rock / H. Zhou, H. Liu, D. Hu, F. Zhong, F. Yang, J. Lu // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. – 2016. – V. 20. – P. 954–970.
8. Fractal analysis on the fracture development of sandstone using AE measurement / Z.Y. Yang, T.H. Huang, Y.X. Zhoo, M.C. Tsai // *Harmonising Rock Engineering and the Environment: Proc. of the 12<sup>th</sup> ISRM International Congress on Rock Mechanics*. – Florida: CRC Press, 2012. – P. 182–183.
9. Jia P., Tang C.A., Zhang Y.B. Numerical study on zonal disintegration of rock mass around deep underground openings // *Harmonising Rock Engineering and the Environment: Proc. of the 12<sup>th</sup> ISRM International Congress on Rock Mechanics*. – Florida: CRC Press, 2012. – P. 179–180.
10. Васючков Ю.Ф. Формы связи метана с углем и эффективность дегазации угольных пластов // *Горный журнал*. – 2016. – № 10. – С. 82–87.

11. Шахтные испытания усовершенствованной технологии подземной пластовой дегазации с использованием гидроразрыва / С.В. Сластунов, Е.П. Ютяев, Е.В. Мазаник, А.П. Садов, А.В. Позин // Уголь. – 2016. – № 11. – С. 32–37.
12. Сластунов С.В., Ермак Г.Л. Обоснование выбора и эффективная реализация способов дегазации при интенсивной отработке газоносных угольных пластов – ключевой вопрос обеспечения метанобезопасности угольных шахт // Уголь. – 2013. – № 1. – С. 21–24.
13. Егорова Е.А., Коликов К.С., Мегид Х.А. Оценка проницаемости угольного пласта с учетом неоднородности в геологической структуре // Горный журнал. – 2016. – № 6. – С. 56–59.
14. Розанцев Е.С., Таран Н.П. Исследование состава углеводородных газов угольных пластов Кузбасса с целью возможного прогнозирования их выбросоопасности // Сб. Повышение безопасности труда при добыче угля. – Кемерово, Изд-во: ВостНИИ, 1990. – С. 88–95.
15. Ганова С.Д., Клюка О.Д. Управление геоэкологической безопасностью техногенных воздействий на компоненты окружающей среды при оценке риска от экзогенных геологических процессов // Известия вузов. Геология и разведка. – 2012. – № 6. – С. 60–63.
16. Исаев О.Н. Экологизация процессов горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 8. – С. 330–332.
17. Stokova L.A. Methods of estimating surface settlement during driving of urban tunnels // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2010. – V. 47 (3). – P. 92–95.
18. Лебедев В.С., Скопинцева О.В. Остаточные газовые компоненты угольных пластов: состав, содержание, потенциальная опасность // Горный журнал. – 2017. – № 4. – С. 84–86.
19. Исследование влияния выхода летучих веществ на взрывоопасность угольной пыли / И.Е. Колесниченко, В.Б. Артемьев, Е.А. Колесниченко, В.Г. Черечукин, Е.И. Любомищенко // Уголь. – 2016. – № 2. – С. 50–55.
20. Обоснование рациональных параметров обеспыливающей обработки угольного массива в шахтах / О.В. Скопинцева, С.В. Иляхин, Д.И. Савельев, А.Ю. Прокопович, А.С. Вертинский // Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 17–19.

Поступила 28.05.2018 г.

#### Информация об авторах

**Ганова С.Д.**, доктор геолого-минералогических наук, заведующая кафедрой техносферной безопасности Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

**Скопинцева О.В.**, доктор технических наук, профессор Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

**Исаев О.Н.**, кандидат биологических наук, доцент Российского государственного геологоразведочного университета им. Серго Орджоникидзе.

UDC 622.807

## ON THE ISSUE OF STUDYING THE COMPOSITION OF HYDROCARBON GASES OF COALS AND DUST TO PREDICT THEIR POTENTIAL HAZARD

Svetlana D. Ganova<sup>1</sup>,  
ganova\_s@mail.ru

Olga V. Skopintseva<sup>1</sup>,  
skopintseva54@mail.ru

Oleg N. Isaev<sup>1</sup>,  
isaevoleg75@mail.ru

<sup>1</sup> Russian State Geological Prospecting University n.a. Sergo Ordzhonikidze,  
23, Miklouho-Maclay street, Moscow, 117997, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to ensure the safety of mining operations on high-gas-bearing outburst-hazardous coal seams, which are dangerous for dust. This direction is associated with the study of the entire composition of the gases of coal-bearing deposits and, in particular, of higher hydrocarbons, and assessment of their role in occurrence of explosive-fire situations and sudden releases of coal and gas in mines. Determining quantitative composition of hydrocarbon gases is a necessary component in identifying the level of outburst seams, as well as determining rational processing parameters of coal seams in order to decrease their gas content and dust-forming ability to reduce the risk of fire and explosion hazards in coal mines.

**The main aim** of the work is to study the composition and quantity of hydrocarbon gases of high-gas-bearing outburst-hazardous coal seams, dangerous in dust; determine the temperature range during thermal degassing for complete recovery of sorbed hydrocarbons; compare the obtained data on hydrocarbons of coal and dust; assess the role of sorbed hydrocarbon coal dust in creating dust-explosion-hazardous situations in coal mines; calculate the amount of higher hydrocarbons in outburst coal seams.

**Methods:** analysis of domestic and foreign experience; collection, systematization and analysis of information available in literary and stock sources on the number and composition of higher hydrocarbon gases of coal seams; gas chromatography using the «Crystal 5000.1» chromatograph, thermal degassing of coal and coal dust samples on the gas chromatograph «M-3700», screen analysis of the fractional composition of coal dust; methods of mathematical statistics for assessing the reliability of the results obtained by the number of higher hydrocarbon gases in coal and coal dust.

**Results.** It was established that the main amount of sorbed hydrocarbons is released from coal during thermal degassing in the temperature range of 200–250 °C. The content of the ultimate hydrocarbons from methane to hexane in gases extracted from coals of the middle stage of metamorphism and coal dust amounted to 13,4–29,1 cm<sup>3</sup>/kg of coal and dust. The enrichment of desorbed hydrocarbons with heavy hydrocarbons was determined, with propane (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) and butane (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) being predominant, the release of which into the mine atmosphere can lead to decrease in the ignition temperature of the dust-air mixture, which represents a potential hazard of fire and explosion hazard in coal mines. The obtained data on higher hydrocarbons can be used to predict the degree of outburst hazard.

### Key words:

Coal mass, coal dust, residual hydrocarbons of coal and dust, higher hydrocarbons, thermal degassing, outburst hazard, fire and explosion hazard in coal mines.

### REFERENCES

1. Yang Lei. A mixed element method for the desorption-diffusion-seepage model of gas flow in deformable coalbed methane reservoirs. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, no. 1, pp. 1–10.
2. Wang L., Cheng Y.-P., Guo P.-K., Li W. Safety line method for the prediction of deep coal-seam gas pressure and its application in coal mines. *Safety Science*, 2012, vol. 50, no. 3, pp. 523–529.
3. Karacan C.O., Ruiz F.A., Coté M., Phipps S. Coal mine methane: a review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction. *International Journal of Coal Geology*, 2011, vol. 86, no. 2, pp. 121–156.
4. Yuan Z., Khakzad N., Khan F., Amyotte P. Risk Analysis of Dust Explosion Scenarios Using Bayesian Networks. *Risk Analysis*, 2015, vol. 35, no. 2, pp. 278–291.
5. Balovtsev S.V. Assessment of the upper-air risk of accidents at mining areas of coal mines that are dangerous for gas and dust explosions. *Gorny Zhurnal*, 2015, no. 5, pp. 91–93. In Rus.
6. Pozdnyakov G.A., Goloskokov E.I., Zakutsky E.L. Problems and prospects for the development of a method of monitoring the explosion safety of mine workings. *Mining*, 2016, no. 4, p. 66–67. In Rus.
7. Zhou H., Liu H., Hu D., Zhong F., Yang F., Lu J. Estimation of the effective thermal properties of cracked rock. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2016, vol. 20, pp. 954–970.
8. Yang Z.Y., Huang T.H., Zhou Y.X., Tsai M.C. Fractal analysis on the fracture development of sandstone using AE measurement. *Harmonising Rock Engineering and the Environment. Proc. of the 12<sup>th</sup> ISRM International Congress on Rock Mechanics*. Florida, CRC Press, 2012. pp. 182–183.
9. Jia P., Tang C.A., Zhang Y.B. Numerical study on zonal disintegration of rock mass around deep underground openings. *Harmonising Rock Engineering and the Environment. Proc. of the 12<sup>th</sup> ISRM International Congress on Rock Mechanics*. Florida, CRC Press, 2012. pp. 179–180.
10. Vasyuchkov Yu.F. The forms of communication of methane with coal and the efficiency of coal seam degassing. *Gorny Zhurnal*, 2016, no. 10, pp. 82–87. In Rus.
11. Slastunov S.V., Yutyayev E.P., Mazanik E.V., Sadov A.P., Poni-zov A.V. Mine tests of the improved technology of underground formation degassing with the use of hydraulic fracturing. *Coal*, 2016, no. 11, pp. 32–37. In Rus.
12. Slastunov S.V., Ermak G.L. Justification of the choice and effective implementation of degassing methods for intensive mining of

- gas-bearing coal seams is a key issue in ensuring the methane safety of coal mines. *Coal*, 2013, no. 1, pp. 21–24. In Rus.
13. Egorova E.A., Kolikov K.S., Megid Kh.A. Estimation of the permeability of a coal seam with allowance for heterogeneity in the geological structure. *Gorny Zhurnal*, 2016, no. 6, pp. 56–59. In Rus.
  14. Rosantsev E.S., Taran N.P. Investigation of the composition of hydrocarbon gases of coal seams in the Kuznetsk Basin with a view to the possible prediction of their outburst hazard. *Sb. Increase of labor safety in coal*, Kemerovo, 1990, pp. 88–95. In Rus.
  15. Ganova S.D., Kluka O.D. Management of geoecological safety of technogenic impacts on environmental components in assessing the risk from exogenous geological processes. *News of universities. Geology and exploration*, 2012, no. 6, pp. 60–63. In Rus.
  16. Isaev O.N. Ecologization of mining processes. *Mountain information and analytical bulletin*, 2009, no. 8, pp. 330–332. In Rus.
  17. Strokova L.A. Methods of estimating surface settlement during driving of urban tunnels, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2010, vol. 47 (3), pp. 92–95.
  18. Lebedev V.S., Skopintseva O.V. Residual gas components of coal seams: composition, content, potential hazard. *Gorny Zhurnal*, 2017, no. 4, pp. 84–86. In Rus.
  19. Kolesnichenko I.E., Artemyev V.B., Kolesnichenko E.A., Cherechukin V.G., Lyubomishchenko E.I. Investigation of the effect of volatile matter on the explosiveness of coal dust. *Coal*, 2016, no. 2, pp. 50–55. In Rus.
  20. Skopintseva O.V., Ilyakhin S.V., Savelyev D.I., Prokopovich A.Yu., Vertinsky A.S. Substantiation of rational parameters of dust removal treatment of coal massif in mines. *Gorny Zhurnal*, 2014, no. 5, pp. 17–19. In Rus.

Received: 28 May 2018.

#### Information about the authors

**Svetlana D. Ganova**, Dr. Sc., professor, Russian State Geological Prospecting University n.a. Sergo Ordzhonikidze.

**Olga V. Skopintseva**, Dr. Sc., professor, Russian State Geological Prospecting University n.a. Sergo Ordzhonikidze.

**Oleg N. Isaev**, Cand. Sc., associate professor, Russian State Geological Prospecting University n.a. Sergo Ordzhonikidze.

УДК 581.1:574:550.4 (571.17)

## ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА *FILIPENDULA ULMARIA* (L.) MAXIM (ROSACEAE) НА ТЕРРИТОРИИ НОВО-УРСКОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА В КЕМЕРОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Горбатюк Екатерина Александровна<sup>1</sup>,  
kolesnikovaea@tpu.ru

Барановская Наталья Владимировна<sup>1</sup>,  
nata@tpu.ru

Жданов Вадим Алексеевич<sup>1</sup>,  
hyfrvadim@gmail.com

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью получения комплексной информации о влиянии радикальных изменений биогеохимического фона в районах распространения хвостохранилищ горнорудного производства с целью прогнозирования путей миграции токсичных компонентов.

**Цель:** выявление изменений в элементном составе корневой и надземной части Лабазника вязолистного (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.) и установление индикаторных показателей техногенного влияния хвостохранилища руд Ново-Урского месторождения. Задачами исследования являются: определение коэффициентов концентраций химических элементов относительно фоновых значений, изучение особенностей пространственного распределения элементов в надземной и корневой частях лабазника вязолистного на территории хвостохранилища, установление коэффициентов аккумуляции химических элементов в корневой части лабазника вязолистного по отношению к надземной.

**Методы.** Сбор растительного материала произведен на флангах Ново-Урского хвостохранилища. Элементный состав лабазника вязолистного определен методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) в лаборатории аналитического центра «Плазма» (г. Томск) по аттестованным методикам. Обработка аналитических данных выполнялась с помощью программ Statistica (6.0) и Excel. Картограммы распределения элементов в надземной и корневой частях лабазника вязолистного построены в программах Surfer (11) и CorelDRAW (16).

**Результаты.** На примере Ново-Урского хвостохранилища в Кемеровской области изучено накопление 67 химических элементов в лабазнике вязолистном. Рассчитаны коэффициенты концентраций элементов относительно фоновой точки и кларка носферы. Составлены геохимические ряды, отражающие избыточное накопление таких элементов, как Zn, Ba, Pb, Tl, Se, Ag, W, Hg, Au, P, превышающих фоновые значения в 5 и более раз. Картограммы пространственного распределения химических элементов в лабазнике вязолистном показали наиболее высокие концентрации элементов в районе расположения отвала переработки окисленных руд и зоны потока рассеяния. Представлены коэффициенты аккумуляции химических элементов в корневой части лабазника вязолистного по отношению к надземным. Выявлено повышенное содержание химических элементов в корнях примерно в 80 % случаев.

### Ключевые слова:

Лабазник вязолистный (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.), химические элементы, Ново-Урское хвостохранилище, коэффициенты концентраций, коэффициенты аккумуляции.

### Введение

Разработка полиметаллических руд в 1930–70-х гг. в России привела к стихийному формированию хранилищ отходов, которые до сих пор являются источниками поступления химических элементов (Pb, Sb, Zn, Cd, As, Ni, Co) в окружающую среду. Приоритетными загрязнителями считаются As, Cd, Cu, Hg, Pb, Zn главным образом потому, что их рассеивание в окружающей природе происходит высокими темпами, и они являются наиболее частыми компонентами антропогенных элементохимических ассоциаций [1].

Растения повсеместно используются при оценке степени загрязнения окружающей среды благодаря высокой способности поглощения широкого ряда химических элементов [2–4]. Часть из них растения используют для жизненно необходимых обменных процессов, но с увеличением концентрации отдельные элементы вызывают токсические эффекты [5–9].

Среди изученных видов выделяется лабазник вязолистный со своей способностью накапливать большой комплекс химических элементов [10–12], что позволяет использовать его в качестве индикатора техногенного воздействия, наряду с другими растительными объектами [13–15].

Лабазник вязолистный, или таволга вязолистная (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.), род многолетних трав, семейство розоцветные (*Rosaceae*) (рис. 1). Травянистое растение, высотой до 1,5–2 м, с мочковатой корневой системой и гладким простым или ветвистым стеблем. Цветет в июне–июле, цветки многочисленные мелкие, белые или светло-желтые, с сильным медовым ароматом, собранные в густые рыхлые соцветия–метелки длиной до 20 см. Плоды – коричневые семянки, созревающие в конце лета. Растение встречается в заболоченной местности, на склонах и по берегам водоемов. Имеет широкий ареал произрастания в Европе, Азии, европейской части России и на территории Западной и Восточной Сибири.



Рис. 1. Лабазник вязолистный (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.)

Fig. 1. Meadowsweet (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.)

Лабазник вязолистный широко используется в народной и традиционной медицине России и ряда европейских стран [16, 17].

#### Объект исследования

Хвостохранилища представляют интерес с точки зрения вторичной выработки значимых компонентов и с позиций оценки природоохранных норм [18].

Область исследуемого района представляет собой низкорослую поверхность, полого спускающуюся в сторону Западно-Сибирской низменности и резко приподнятую над Кузнецкой котловиной. Ново-Урское месторождение открыто в 1932 г. и является самым крупным месторождением группы колчеданных медно-цинковых месторождений Урского рудного поля. Расположено в п. Урск (Барит) Гурьевского района Кемеровской области [19].

Среди сульфидных руд месторождений Урской группы зарегистрированы следующие рудные минералы: пирит, сфалерит, халькопирит, блеклая руда, галенит, арсенопирит, аргентит, золото, борнит, ковеллин, халькозин и др. Из жильных минералов наибольшим распространением пользуются: кварц, серицит, барит, кальцит и гипс. Относительно содержания меди и цинка были выявлены три промышленных сорта руд: медная и медно-цинковая, цинковая, серно-колчеданная. Для извлечения золота отработаны только кварц-пиритовая и кварц-баритовая сыпучки. Другие части рудных тел сохранились нетронутыми [20, 21].

Хвостохранилище содержит в своем составе отработанные первичные руды и руды зоны окисления, складированные в два насыпных отвала высотой около 10–12 м. Отвал отходов первичных руд на 50–90 % сложен пиритом и практически полностью выбран для вторичной переработки, а отвал из отходов зоны окисления остался в первоначальном виде. Природный ручей, протекающий по логу хвостохранилища, дождевые и паводковые воды, дренируя материал отходов, подкисляются и распространяют незакрепленное вещество вплоть до реки Ур (приток реки Иня). Здесь происходит активное распространение растворенных форм металлов в речную сеть и подземные воды. Растительный покров, в результате воздействия кислых дренажных растворов, полностью уничтожен, и вся территория вдоль русла ручья покрыта болотными кочками [21–23] (рис. 2, А). Расположенный рядом с хвостохранилищем карьер заполнен водой и используется для ловли рыбы и купания местными жителями.

Материалом для исследования послужила надземная и корневая часть лабазника вязолистного. Образцы собраны в июле 2015 г. в сухую погоду в фазу цветения – начала плодоношения на территории Ново-Урского хвостохранилища. Сбор растения проведен в непосредственной близости к самой

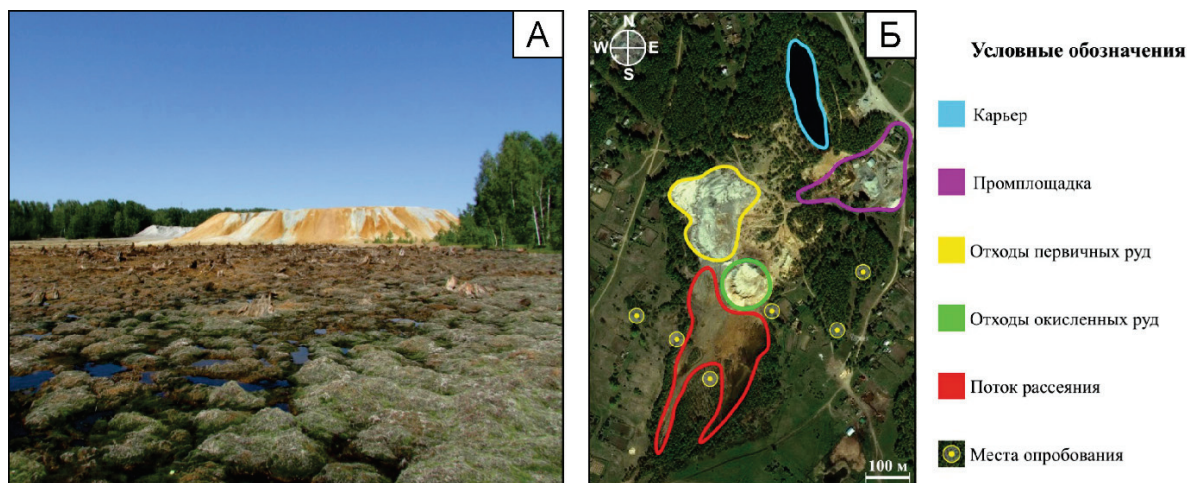


Рис. 2. Общий вид Ново-Урского хвостохранилища (А), карта-схема отбора проб Лабазника вязолистного (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.) (Б)

Fig. 2. General view of Novo-Urskoe tailing (A), map-scheme of Meadowsweet (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.) sampling (B)

территории хвостохранилища, согласно схеме, представленной на рис. 2, Б. Условно фоновый образец отобран в районе озера Урское в 4 км к юго-востоку от хвостохранилища, вдали от источника техногенного воздействия.

Каждый экземпляр растения помещался в индивидуальный стерильный пакет, далее высушивался воздушно-теневым способом без воздействия дополнительных температур для получения наиболее точных результатов [24]. Корневая часть предварительно промывалась в дистиллированной воде. Сухие пробы измельчались до мелкой крошки. Для проведения аналитических исследований брали навески по 100 мг. Элементный состав лабазника вязолистного определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой

(ИСП-МС) в лаборатории аналитического центра «Плазма» (г. Томск) по аттестованным методикам, с использованием государственного стандартного образца состава: лист березы ЛБ-1 (ГСО 8923–2007; СО КООМЕТ 0067–2008–RU). В каждой пробе определено содержание 67 химических элементов. Использование метода ИСП-МС позволяет определить минимальные значения большинства элементов, вплоть до их фонового содержания [25].

#### Результаты исследований и их обсуждение

Для растений наиболее опасными являются такие элементы, как Cu, Hg, Ni, Co, Pb, Ag, Cd, Be и Sn. Несмотря на то, что растения быстро приспосабливаются к химическим стрессам, они все же мо-

**Таблица 1.** Среднее содержание элементов в сухом веществе надземной части Лабазника вязолистного (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.) на территории Ново-Урского хвостохранилища и коэффициенты концентрации относительно условного фона и кларка ноосферы, мг/кг

**Table 1.** Average content of elements in dry matter of the overground section of Meadowsweet (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.) on the territory of the Novo-Urskoe tailing and coefficients of concentration relative to the conditional background and the clark of the noosphere, mg/kg

| Элемент<br>Element | Среднее (C <sub>c</sub> ),<br>мг/кг; (n=12)<br>Average (C <sub>c</sub> ),<br>mg/kg; (n=12) | Фон (Ф), мг/кг<br>Background<br>(Ф), mg/kg | Кларк ноосферы<br>** (K <sub>n</sub> ), мг/кг<br>Clark of the no-<br>osphere ** (K <sub>n</sub> ),<br>mg/kg | K <sub>к(ф)</sub> = C <sub>c</sub> /Ф | K <sub>к(н)</sub> = C <sub>c</sub> /K <sub>n</sub> | Элемент<br>Element | Среднее (C <sub>c</sub> ),<br>мг/кг; (n=12)<br>Average (C <sub>c</sub> ),<br>mg/kg; (n=12) | Фон (Ф),<br>мг/кг<br>Background<br>(Ф), mg/kg | Кларк ноосферы **<br>(K <sub>n</sub> ), мг/кг<br>Clark of the no-<br>osphere ** (K <sub>n</sub> ),<br>mg/kg | K <sub>к(ф)</sub> = C <sub>c</sub> /Ф | K <sub>к(н)</sub> = C <sub>c</sub> /K <sub>n</sub> |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Li                 | 10,3±4,02                                                                                  | 5,67                                       | 19                                                                                                          | 1,8                                   | 0,5                                                | In*                | <0,002                                                                                     | 0,002                                         | 0,06                                                                                                        | –                                     | –                                                  |
| Be*                | <0,15                                                                                      | 0,15                                       | 1                                                                                                           | –                                     | –                                                  | Sn                 | 0,08±0,02                                                                                  | 0,03                                          | 4,9                                                                                                         | 3,2                                   | 0,02                                               |
| B                  | 24,9±4,81                                                                                  | 18,7                                       | 50                                                                                                          | 1,3                                   | 0,5                                                | Sb                 | 0,11±0,03                                                                                  | 0,05                                          | 0,25                                                                                                        | 2,0                                   | 0,4                                                |
| Na                 | 46,8±6,41                                                                                  | 21                                         | 19000                                                                                                       | 2,2                                   | 0,002                                              | Cs                 | 0,01±0,002                                                                                 | 0,007                                         | 5,9                                                                                                         | 1,5                                   | 0,002                                              |
| Mg                 | 3590±496                                                                                   | 5548                                       | 9000                                                                                                        | 0,6                                   | 0,4                                                | Ba                 | 155±40,7                                                                                   | 9,48                                          | 36                                                                                                          | 16,4                                  | 4,3                                                |
| Al                 | 119±21,6                                                                                   | 69                                         | 61000                                                                                                       | 1,7                                   | 0,002                                              | La                 | 0,06±0,01                                                                                  | 0,05                                          | 12                                                                                                          | 1,1                                   | 0,005                                              |
| Si                 | 3129±973                                                                                   | 1448                                       | 165000                                                                                                      | 2,2                                   | 0,02                                               | Ce                 | 0,10±0,02                                                                                  | 0,11                                          | 32                                                                                                          | 0,9                                   | 0,003                                              |
| Nd                 | 0,05±0,01                                                                                  | 0,05                                       | 16                                                                                                          | 0,9                                   | 0,003                                              | K                  | 20145±1801                                                                                 | 14081                                         | 16000                                                                                                       | 1,4                                   | 1,3                                                |
| Pr                 | 0,01±0,002                                                                                 | 0,01                                       | 3,8                                                                                                         | 0,9                                   | 0,003                                              | P                  | 2535±223                                                                                   | 2176                                          | 500                                                                                                         | 1,2                                   | 5,1                                                |
| Ca                 | 6245±823                                                                                   | 7629                                       | 16000                                                                                                       | 0,8                                   | 0,4                                                | Sm                 | 0,01±0,004                                                                                 | 0,01                                          | 4,5                                                                                                         | 0,8                                   | 0,003                                              |
| Sc                 | 0,11±0,03                                                                                  | 0,03                                       | 7                                                                                                           | 4,5                                   | 0,02                                               | Eu                 | 0,001±0,0004                                                                               | 0,0004                                        | 0,64                                                                                                        | 3,3                                   | 0,002                                              |
| Ti                 | 45,9±7,48                                                                                  | 35                                         | 4600                                                                                                        | 1,3                                   | 0,02                                               | Gd                 | 0,009±0,002                                                                                | 0,007                                         | 4,9                                                                                                         | 1,4                                   | 0,002                                              |
| V                  | 0,53±0,08                                                                                  | 0,6                                        | 70                                                                                                          | 0,9                                   | 0,008                                              | Tb                 | 0,001±0,0002                                                                               | 0,001                                         | 0,64                                                                                                        | 0,7                                   | 0,002                                              |
| Cr                 | 2,79±0,13                                                                                  | 2,88                                       | 50                                                                                                          | 1,0                                   | 0,1                                                | Dy                 | 0,007±0,001                                                                                | 0,003                                         | 3                                                                                                           | 2,4                                   | 0,002                                              |
| Mn                 | 112±27,2                                                                                   | 40                                         | 440                                                                                                         | 2,8                                   | 0,3                                                | Ho                 | 0,001±0,0002                                                                               | 0,0004                                        | 0,76                                                                                                        | 2,6                                   | 0,001                                              |
| Fe                 | 177±26,4                                                                                   | 106                                        | 350                                                                                                         | 1,7                                   | 0,008                                              | Er                 | 0,003±0,0006                                                                               | 0,001                                         | 1,7                                                                                                         | 3,3                                   | 0,005                                              |
| Co                 | 0,37±0,04                                                                                  | 0,49                                       | 22                                                                                                          | 0,8                                   | 0,02                                               | Tm                 | 0,0003±0,00009                                                                             | 0,0005                                        | –                                                                                                           | 0,6                                   | –                                                  |
| Ni                 | 2,01±0,65                                                                                  | 1,55                                       | 10                                                                                                          | 1,3                                   | 0,2                                                | Yb                 | 0,003±0,0006                                                                               | 0,002                                         | 1,9                                                                                                         | 1,5                                   | 0,002                                              |
| Cu                 | 8,89±0,90                                                                                  | 13,7                                       | 45                                                                                                          | 0,7                                   | 0,2                                                | Lu                 | 0,0006±0,00006                                                                             | 0,0005                                        | 0,45                                                                                                        | 1,2                                   | 0,001                                              |
| Zn                 | 112±29,7                                                                                   | 2                                          | 46                                                                                                          | 55,1                                  | 2,4                                                | Hf                 | 0,004±0,0007                                                                               | 0,003                                         | 2,5                                                                                                         | 1,6                                   | 0,002                                              |
| Ga                 | 0,06±0,007                                                                                 | 0,04                                       | 17                                                                                                          | 1,4                                   | 0,003                                              | Ta                 | 0,002±0,0004                                                                               | 0,004                                         | 1,9                                                                                                         | 0,4                                   | 0,0009                                             |
| Ge*                | <0,15                                                                                      | 0,15                                       | 1,1                                                                                                         | –                                     | –                                                  | W                  | 0,31±0,03                                                                                  | 0,05                                          | 1,3                                                                                                         | 5,9                                   | 0,2                                                |
| As                 | 0,40±0,07                                                                                  | 0,33                                       | 3                                                                                                           | 1,2                                   | 0,1                                                | Re                 | 0,0009±0,0003                                                                              | 0,0005                                        | 0,0005                                                                                                      | 1,7                                   | 1,9                                                |
| Se                 | 7,15±2,13                                                                                  | 1                                          | 0,28                                                                                                        | 7,2                                   | 25,6                                               | Os*                | <0,0005                                                                                    | 0,0005                                        | 0,03                                                                                                        | –                                     | –                                                  |
| Rb                 | 8,27±1,91                                                                                  | 5                                          | 96                                                                                                          | 1,7                                   | 0,1                                                | Ir*                | <0,001                                                                                     | 0,001                                         | 0,004                                                                                                       | –                                     | –                                                  |
| Sr                 | 16±2,13                                                                                    | 18                                         | 240                                                                                                         | 0,9                                   | 0,1                                                | Pt                 | 0,007±0,0003                                                                               | 0,04                                          | 0,13                                                                                                        | 0,2                                   | 0,1                                                |
| Y                  | 0,04±0,008                                                                                 | 0,03                                       | 20,5                                                                                                        | 1,4                                   | 0,002                                              | Au                 | 0,004±0,0003                                                                               | 0,004                                         | 0,0007                                                                                                      | 1,1                                   | 6,3                                                |
| Zr                 | 0,22±0,04                                                                                  | 0,15                                       | 12                                                                                                          | 1,4                                   | 0,02                                               | Hg                 | 0,08±0,02                                                                                  | 0,02                                          | 0,18                                                                                                        | 5,3                                   | 0,5                                                |
| Nb                 | 0,02±0,003                                                                                 | 0,01                                       | 13                                                                                                          | 1,5                                   | 0,02                                               | Tl                 | 0,05±0,03                                                                                  | 0,006                                         | 0,79                                                                                                        | 8,7                                   | 0,1                                                |
| Mo                 | 0,21±0,05                                                                                  | 0,97                                       | 1,1                                                                                                         | 0,2                                   | 0,2                                                | Pb                 | 4,48±2,20                                                                                  | 0,34                                          | 12                                                                                                          | 13,3                                  | 0,4                                                |
| Ru*                | <0,05                                                                                      | 0,05                                       | 0,03                                                                                                        | –                                     | –                                                  | Bi                 | 0,01±0,002                                                                                 | 0,005                                         | 0,005                                                                                                       | 2,5                                   | 1,9                                                |
| Rh*                | <0,009                                                                                     | 0,009                                      | 0,006                                                                                                       | –                                     | –                                                  | Th                 | 0,01±0,002                                                                                 | 0,008                                         | 7,6                                                                                                         | 1,4                                   | 0,001                                              |
| Cd                 | 0,13±0,03                                                                                  | 0,04                                       | 0,16                                                                                                        | 3,3                                   | 0,8                                                | U                  | 0,004±0,0007                                                                               | 0,004                                         | 1,9                                                                                                         | 1,1                                   | 0,002                                              |
| Ag                 | 0,04±0,006                                                                                 | 0,007                                      | 0,05                                                                                                        | 6,0                                   | 0,9                                                |                    |                                                                                            |                                               |                                                                                                             |                                       |                                                    |

Примечание: n – количество проб; \* содержание элементов ниже предела определения; \*\* по Н.Ф. Глазовскому [27].

Note: n – number of samples; \* the content of the elements is below the definition limit; \*\* according to N.F. Glazovsky [27].

гут быть очень чувствительны к высоким концентрациям конкретного микроэлемента [26]. Лабазник вязолистный накапливает в больших концентрациях практически весь ряд перечисленных элементов.

По полученным аналитическим данным составлена таблица средних содержаний химических элементов надземной части лабазника вязолистного и рассчитаны коэффициенты концентрации относительно условно фоновой точки оз. Урское (Кк (ф)) и кларка ноосферы (Кк (н)). (табл. 1).

Исходя из данных табл. 1, средние содержания химических элементов в лабазнике вязолистном на территории хвостохранилища превышают фоновые значения для большинства элементов. Геохимический ряд, построенный относительно условного фона – оз. Урское, отражает избыточное накопление в 5 и более раз таких элементов, как  $Zn_{55,1} > Ba_{16,4} > Pb_{13,3} > Tl_{8,7} > Se_{7,2} > Ag_{6,0} > W_{5,9} > Hg_{5,3}$ .

Геохимическая специфика территории Ново-Урского хвостохранилища отражается также в геохимическом ряде, построенном относительно кларка ноосферы. Представленные химические элементы превышают коэффициенты концентрации более чем в 2 раза:  $Se_{25,6} > Au_{6,3} > P_{5,1} > Ba_{4,3} > Zn_{2,4}$ .

Полученные нами аналитические данные позволяют сделать вывод о том, что данный вид является хорошим индикатором изменений природной среды, происходящих в результате влияния Ново-Урского хвостохранилища.

Так, на наш взгляд, накопление Zn, Ba, Pb, Ag, Hg, Au напрямую зависит от их содержания в отвалах, поскольку, согласно литературным данным, именно такой спектр элементов характерен для отходов, складированных на изучаемой территории (табл. 2).

Накопление ртути в растениях, произрастающих на загрязненных участках, отмечается гораздо выше, чем в естественных условиях [29, 30].

Как показывают геохимические ряды, более целесообразным является применение местного условного фона, позволяющего получить более яркую картину по специфике влияния хвостов данного месторождения.

Повышенное содержание Hg, с коэффициентом накопления более 5, характерно для растений данной территории, потому что до недавнего времени в мировой практике широко применялся процесс извлечения благородных металлов при помощи жидкой ртути – амальгамации, что привело к ее накоплению в хвостохранилищах [29]. Изначально в складированных отходах Ново-Урского хвостохра-

нилища выявлены высокие содержания Hg (в первичных 100 мкг/г, в окисленных 20–30 мкг/г). Данный фактор повлиял на распространение Hg в объектах окружающей среды не только вблизи хвостохранилища, но и на значительном удалении от него. Помимо фиксируемых нами накоплений, также выявлены высокие концентрации ртути в рыбе и грибах и установлено наличие элемента в питьевой воде поселка [31].

Повышенное содержание Pb ( $K_k=13,3$ ) и Zn ( $K_k=55,1$ ) в составе лабазника вязолистного, отраженное в геохимических рядах на данной территории, связано с тем, что после переработки сульфид-содержащих руд в материалах отходов формируются кислые растворы с высоким содержанием этих и некоторых других элементов, которые широко распространяются и концентрируются путем перехода через корневую систему из питающих растворов в растениях [23].

Высокое содержание бария, с коэффициентом концентрации более 16 относительно фона и 4,3 относительно кларка ноосферы, в лабазнике вязолистном объясняется наличием минерала барита на месторождениях Урской группы [20, 32]. Формула барита  $BaSO_4$  с примесями Sr, Ca, P – эти элементы также имеют высокие концентрации по сравнению с фоновой точкой и кларком ноосферы.

Повышенная концентрация Se, относительно кларка ноосферы  $K_k=25,6$  и относительно фона  $K_k=7,2$ , проявляется непосредственно благодаря образованию собственных минеральных форм – тиманнита (селенида ртути –  $HgSe$ ) [33] и преобладающему рудному материалу – пириту. Для сульфидов железа нередкими примесями являются такие элементы, как Se, Co, Ni, As, Cu, Au. Также Se является примесью галенита – свинцовой руды, которая входит в состав рудных тел Ново-Урского месторождения [20, 32]. Его растворенные формы легко извлекаются растением из почв, что является известным фактором, согласно литературным источникам [26].

Таллий концентрируется в лабазнике вязолистном, собранном на территории Ново-Урского хвостохранилища, с коэффициентом более 8 относительно фоновых данных. Он входит в состав разнообразных минералов, главным образом сульфидов. Концентрация Tl в растении напрямую зависит от концентрации его в почве. Травянистые и древесные растения накапливают Tl больше, чем другие растительные виды. Согласно литературным данным, повышенное содержание Tl в тканях растения является токсичным [1, 26].

Таблица 2. Содержание элементов в отходах, образующих отвалы Ново-Урского хвостохранилища

Table 2. Content of elements in the waste, forming the dumps of Novo-Urskoe tailing

| Элемент/Element |                                         | Cu            | Mn | Zn  | Au   | Pb   | Hg | Ag | Na  | Al  | Mg  | K   | Fe | Ca  | Ba |
|-----------------|-----------------------------------------|---------------|----|-----|------|------|----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|
|                 |                                         | мг/кг (mg/kg) |    |     |      |      |    |    |     | %   |     |     |    |     |    |
| Отходы          | Первичные руды/Primary ores             | 122           | 25 | 174 | 0,6  | 1540 | 59 | 15 | 2   | 0,2 | 1,3 | 1,5 | 25 | 3   | 16 |
| Tailings        | Руды зон окисления/Ores oxidation zones | 100           | 45 | 134 | 0,47 | 190  | 65 | 11 | 0,5 | 2   | 0,1 | 0,5 | 7  | 0,3 | 4  |

Примечание: по данным И.Н. Мяжко и др. [28].

Note: according to I.N. Myagkov and others [28].

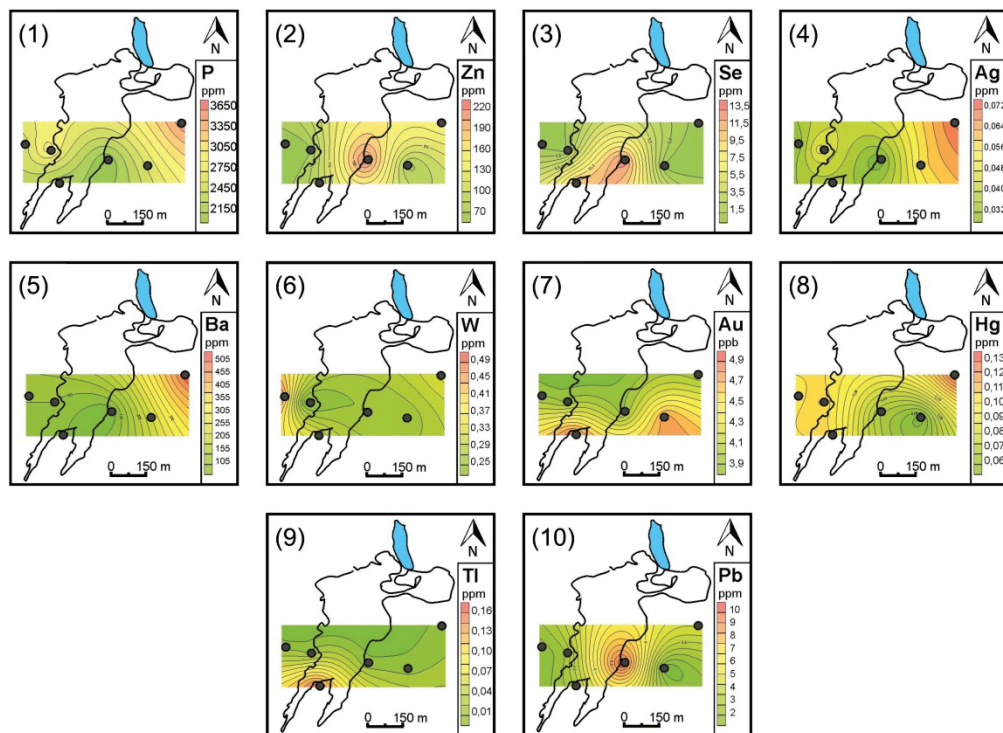


Рис. 3. Картошхемы распределения химических элементов в надземной части Лабазника вязолистного (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.) на территории Ново-Урского хвостохранилища

Fig. 3. Map-scheme of chemical elements distribution in overground section of Meadowsweet (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.) on the territory of Novo-Urskoe tailing

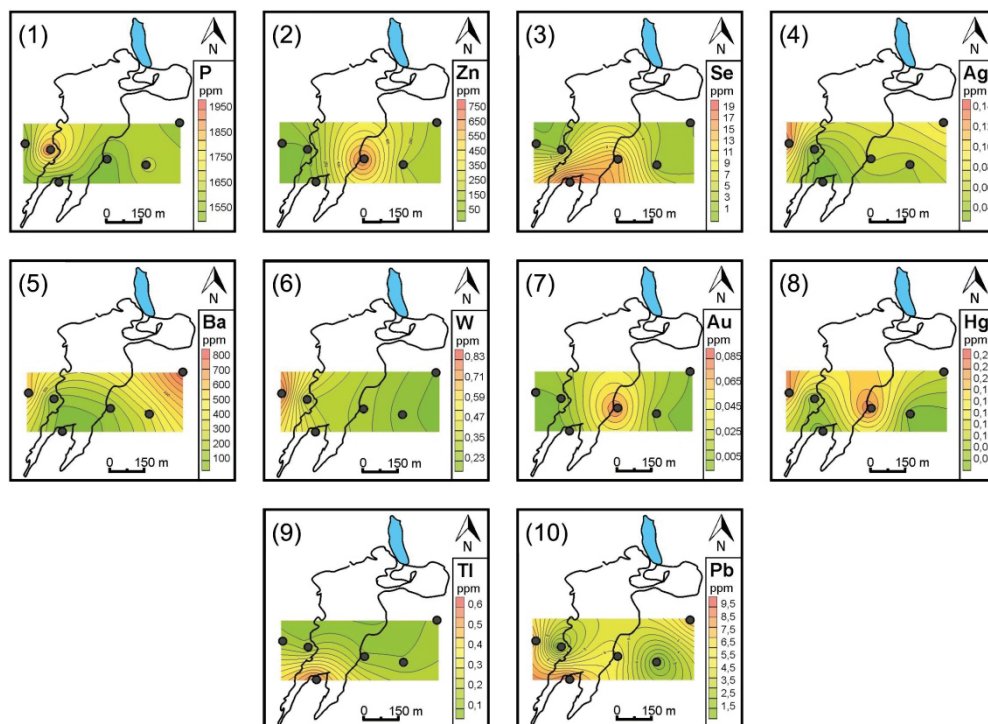


Рис. 4. Картошхемы распределения химических элементов в корневой части Лабазника вязолистного (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.) на территории Ново-Урского хвостохранилища

Fig. 4. Map-scheme of chemical elements distribution in root section of Meadowsweet (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.) on the territory of Novo-Urskoe tailing

Вольфрам при определенных условиях легко доступен для растений. Поэтому, вероятно, его повышенные концентрации практически в 6 раз превышающие фон, характерны для растений, произрастающих на почвах, перекрывающих рудные тела. Токсичность W для растения оценивается как умеренная [26].

Нами также изучены особенности пространственного накопления в лабазнике вязолистном химических элементов, ярко выделяющихся в геохимических рядах относительно фоновой точки (Zn, Ba, Pb, Tl, Se, Ag, W, Hg) и кларка ноосферы (Se, Au, P, Ba, Zn). Составлены картосхемы распределения элементов в надземной и корневой части растения вблизи хвостохранилища и на небольшом удалении от него (рис. 3, 4).

Анализ схем распределения химических элементов в лабазнике вязолистном свидетельствует о том, что в основном высокие концентрации элементов отмечаются в районе расположения отвала переработки окисленных руд и зоны потока рассеяния. Отвал окисленных руд проявляется по таким халькофильным элементам, как Zn, Se, Pb, в надземной части растения и Zn, Se, Au и Hg в корнях.

Наибольшие концентрации Se, Tl, Pb в корневой части лабазника отмечаются в потоке рассеяния. Это может быть связано с тем, что дренажный ручей, протекающий по логу Ново-Урского хвостохранилища, способствует переходу многих химических элементов, которые распространяются по области рассеяния и легко поступают в корневую систему растения в растворенной форме. Высокие концентрации Se, Au и Tl в надземной части растения также отмечаются в потоке рассеяния. Вблизи отвалов первичной руды зафиксировано повышенное накопление в корнях таких элементов, как P, Ag, и W, также отмечается повышенными концентрациями W и в надземной части растения.

Полученные данные позволяют предположить, что на содержание элементов в надземной части лабазника вязолистного большое влияние оказывает промплощадка. Такие элементы, как P, Ag, Ba, Hg, имеют высокое накопление в растениях и входят в число основных компонентов первичных руд. В этом случае играет роль фактор пыления (при дроблении и сортировке отходов первичных руд). В корневой части Ba также проявляется в наибольшей концентрации вблизи промплощадки.

Нами изучены барьерные функции корневой системы лабазника вязолистного, произрастающего на территории Ново-Урского хвостохранилища. При сопоставлении содержания химических элементов в надземной и корневой частях растений было определено, что в корнях выявляются повышенные концентрации более чем в 80 % случаях (табл. 3).

И.Г. Важенин [34] в качестве биоиндикатора загрязненности почвы предложил использовать коэффициент аккумуляции или коэффициент биологического поглощения – отношение concentra-

ции элементов в корневой части растения относительно надземной. Показатель аккумуляции отображает адаптационные способности растений и обуславливается качествами растения и земли.

Нами рассчитаны коэффициенты аккумуляции лабазника вязолистного, согласно которым в корнях растений содержание таких элементов, как Nb, Ce, Pr, La, Nd, Ta, Al, Lu, Th, Dy, Gd, Y, Yb, Er, Ho, U, Tb, Eu, Tm, в 10–20 раз выше, чем в надземных органах. Барьерная роль корневой системы выражена слабее в отношении Fe, Ga, Na, Cs, Zr, Sm, Hf: эти элементы имеют коэффициент аккумуляции 5–9, а у таких элементов, как Hg, Mn, Ag, Ti, Co, Zn, Bi, Ba, Sr, Tl, As, Sb, Sc, Cd, V, Au, коэффициент аккумуляции варьируется от 1,5 до 4.

Таким образом, проведенные исследования аккумуляции 67 химических элементов в органах лабазника вязолистного показали, что примерно в 80 % случаев химические элементы преимущественно аккумулируются в корневой части растения. И менее чем в 20 % проявляется отсутствие барьерных механизмов защиты, что приводит к общему повышению содержания химических элементов в надземных органах растения.

#### Заключение

В результате проведенной работы нами установлено, что лабазник вязолистный (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.) накапливает большой спектр химических элементов. В процессе проведения исследований на территории Ново-Урского хвостохранилища Кемеровской области выявлены повышенные концентрации таких элементов, как Zn, Ba, Pb, Tl, Se, Ag, W, Hg, Au, P, по сравнению с фоновым показателем и относительно кларка ноосферы в 5 и более раз. Накопление этих элементов можно непосредственно связать с воздействием Ново-Урского хвостохранилища на объекты природной среды.

Проанализированы картосхемы распределения химических элементов в лабазнике вязолистном, из которых видно, что в основном высокие концентрации элементов фиксируются в районе расположения отвала переработки окисленных руд и зоны потока рассеяния. Также отмечается влияние промплощадки на концентрации химических элементов в надземной части за счет распространения элементов ветряными потоками.

Нами рассчитаны барьерные функции корневой системы лабазника вязолистного. Согласно коэффициенту аккумуляции, в корнях растений содержание таких элементов, как Nb, Ce, Pr, La, Nd, Ta, Al, Lu, Th, Dy, Gd, Y, Yb, Er, Ho, U, Tb, Eu, Tm, в 10–20 раз выше, чем в надземных органах. В целом около 80 % изученных нами химических элементов проявляются в более высоких концентрациях в корневой системе растения.

В целом проведенные исследования позволяют использовать данный вид в качестве биогеохимического индикатора по определенному спектру химических элементов для выявления специфики

**Таблица 3.** Коэффициенты аккумуляции химических элементов в корневой части Лабазника вязолистного (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.) по отношению к надземной части

**Table 3.** Coefficients of chemical elements accumulation in the root sections of Meadowsweet (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.) in relation to the overground section

| Элемент<br>Element | Среднее (C <sub>c</sub> ), мг/кг;<br>Надземная часть<br>Average (C <sub>c</sub> ), mg/kg;<br>Overground section | Среднее (C <sub>c</sub> ), мг/кг;<br>Корневая часть<br>Average (C <sub>c</sub> ), mg/kg;<br>Root sections | Коэффициент<br>аккумуляции<br>Accumulation<br>coefficient | Элемент<br>Element | Среднее (C <sub>c</sub> ), мг/кг;<br>Надземная часть<br>Average (C <sub>c</sub> ), mg/kg;<br>Overground section | Среднее (C <sub>c</sub> ), мг/кг;<br>Корневая часть<br>Average (C <sub>c</sub> ), mg/kg;<br>Root sections | Коэффициент<br>аккумуляции<br>Accumulation<br>coefficient |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Li                 | 10,3±4,02                                                                                                       | 1,12±0,52                                                                                                 | 0,1                                                       | In*                | <0,002                                                                                                          | <0,002                                                                                                    | –                                                         |
| Be*                | <0,15                                                                                                           | <0,15                                                                                                     | –                                                         | Sn                 | 0,08±0,02                                                                                                       | 0,10±0,04                                                                                                 | 1,3                                                       |
| B                  | 24,9±4,81                                                                                                       | 27,0±4,84                                                                                                 | 1,1                                                       | Sb                 | 0,11±0,03                                                                                                       | 0,27±0,11                                                                                                 | 2,6                                                       |
| Na                 | 46,8±6,41                                                                                                       | 305±103                                                                                                   | 6,5                                                       | Cs                 | 0,01±0,002                                                                                                      | 0,08±0,05                                                                                                 | 7,0                                                       |
| Mg                 | 3590±496                                                                                                        | 2968±309                                                                                                  | 0,8                                                       | Ba                 | 155±40,7                                                                                                        | 332±120                                                                                                   | 2,1                                                       |
| Al                 | 119±21,6                                                                                                        | 1326±752                                                                                                  | 11,2                                                      | La                 | 0,06±0,01                                                                                                       | 0,60±0,32                                                                                                 | 10,7                                                      |
| Si                 | 3129±973                                                                                                        | 3953±2357                                                                                                 | 1,3                                                       | Ce                 | 0,10±0,02                                                                                                       | 1,03±0,60                                                                                                 | 10,5                                                      |
| Nd                 | 0,05±0,01                                                                                                       | 0,49±0,30                                                                                                 | 10,8                                                      | K                  | 20145±1801                                                                                                      | 11539±674                                                                                                 | 0,6                                                       |
| Pr                 | 0,01±0,002                                                                                                      | 0,12±0,07                                                                                                 | 10,5                                                      | P                  | 2535±223                                                                                                        | 1620±75,8                                                                                                 | 0,6                                                       |
| Ca                 | 6245±823                                                                                                        | 6532±511                                                                                                  | 1,0                                                       | Sm                 | 0,01±0,004                                                                                                      | 0,10±0,06                                                                                                 | 8,8                                                       |
| Sc                 | 0,11±0,03                                                                                                       | 0,30±0,09                                                                                                 | 2,7                                                       | Eu                 | 0,001±0,0004                                                                                                    | 0,02±0,02                                                                                                 | 19,9                                                      |
| Ti                 | 45,9±7,48                                                                                                       | 85,6±48,0                                                                                                 | 1,9                                                       | Gd                 | 0,009±0,002                                                                                                     | 0,12±0,07                                                                                                 | 12,9                                                      |
| V                  | 0,53±0,08                                                                                                       | 1,91±1,08                                                                                                 | 3,6                                                       | Tb                 | 0,001±0,0002                                                                                                    | 0,02±0,01                                                                                                 | 15,5                                                      |
| Cr                 | 2,79±0,13                                                                                                       | 3,58±0,78                                                                                                 | 1,3                                                       | Dy                 | 0,007±0,001                                                                                                     | 0,08±0,05                                                                                                 | 12,4                                                      |
| Mn                 | 112±27,2                                                                                                        | 206±75,1                                                                                                  | 1,8                                                       | Ho                 | 0,001±0,0002                                                                                                    | 0,02±0,01                                                                                                 | 15,3                                                      |
| Fe                 | 177±26,4                                                                                                        | 890±450                                                                                                   | 5,0                                                       | Er                 | 0,003±0,0006                                                                                                    | 0,05±0,03                                                                                                 | 15,0                                                      |
| Co                 | 0,37±0,04                                                                                                       | 0,72±0,20                                                                                                 | 1,9                                                       | Tm                 | 0,0003±0,00009                                                                                                  | 0,01±0,004                                                                                                | 20,2                                                      |
| Ni                 | 2,01±0,65                                                                                                       | 2,40±0,95                                                                                                 | 1,2                                                       | Yb                 | 0,003±0,0006                                                                                                    | 0,04±0,03                                                                                                 | 14,6                                                      |
| Cu                 | 8,89±0,90                                                                                                       | 10,7±1,23                                                                                                 | 1,2                                                       | Lu                 | 0,0006±0,00006                                                                                                  | 0,01±0,004                                                                                                | 11,4                                                      |
| Zn                 | 112±29,7                                                                                                        | 209±103                                                                                                   | 1,9                                                       | Hf                 | 0,004±0,0007                                                                                                    | 0,04±0,02                                                                                                 | 9,3                                                       |
| Ga                 | 0,06±0,007                                                                                                      | 0,31±0,17                                                                                                 | 5,3                                                       | Ta                 | 0,002±0,0004                                                                                                    | 0,02±0,01                                                                                                 | 10,9                                                      |
| Ge*                | <0,15                                                                                                           | <0,15                                                                                                     | –                                                         | W                  | 0,31±0,03                                                                                                       | 0,39±0,10                                                                                                 | 1,2                                                       |
| As                 | 0,40±0,07                                                                                                       | 1,05±0,30                                                                                                 | 2,6                                                       | Re                 | 0,0009±0,0003                                                                                                   | <0,0009                                                                                                   | 0,6                                                       |
| Se                 | 7,15±2,13                                                                                                       | 5,76±3,10                                                                                                 | 0,8                                                       | Os*                | <0,0005                                                                                                         | <0,0005                                                                                                   | –                                                         |
| Rb                 | 8,27±1,91                                                                                                       | 5,42±1,51                                                                                                 | 0,7                                                       | Ir*                | <0,001                                                                                                          | <0,001                                                                                                    | –                                                         |
| Sr                 | 16,02±2,13                                                                                                      | 34,9±4,30                                                                                                 | 2,2                                                       | Pt                 | 0,007±0,0003                                                                                                    | 0,01±0,001                                                                                                | 1,1                                                       |
| Y                  | 0,04±0,008                                                                                                      | 0,54±0,28                                                                                                 | 13,8                                                      | Au                 | 0,004±0,0003                                                                                                    | 0,02±0,01                                                                                                 | 4,3                                                       |
| Zr                 | 0,22±0,04                                                                                                       | 1,78±1,16                                                                                                 | 8,2                                                       | Hg                 | 0,08±0,02                                                                                                       | 0,13±0,04                                                                                                 | 1,5                                                       |
| Nb                 | 0,02±0,003                                                                                                      | 0,20±0,13                                                                                                 | 10,5                                                      | Tl                 | 0,05±0,03                                                                                                       | 0,12±0,09                                                                                                 | 2,5                                                       |
| Mo                 | 0,21±0,05                                                                                                       | 0,19±0,03                                                                                                 | 0,9                                                       | Pb                 | 4,48±2,20                                                                                                       | 6,00±1,44                                                                                                 | 1,3                                                       |
| Ru*                | <0,05                                                                                                           | <0,05                                                                                                     | –                                                         | Bi                 | 0,01±0,002                                                                                                      | 0,02±0,01                                                                                                 | 2,0                                                       |
| Rh*                | <0,009                                                                                                          | <0,009                                                                                                    | –                                                         | Th                 | 0,01±0,002                                                                                                      | 0,13±0,09                                                                                                 | 11,9                                                      |
| Cd                 | 0,13±0,03                                                                                                       | 0,37±0,11                                                                                                 | 2,8                                                       | U                  | 0,004±0,0007                                                                                                    | 0,06±0,03                                                                                                 | 15,4                                                      |
| Ag                 | 0,04±0,006                                                                                                      | 0,08±0,02                                                                                                 | 1,8                                                       |                    |                                                                                                                 |                                                                                                           |                                                           |

Примечание: n – количество проб; \* содержание элементов ниже предела определения.

Note: n – number of samples; \* the content of the elements is below the definition limit.

техногенного воздействия в зонах влияния объектов горнорудного производства с золото-полиметаллической специализацией.

Авторы выражают благодарность доктору геолого-минералогических наук, профессору Л.П. Рихванову за орга-

низацию и помощь в проведении экспедиционных работ, а также за обсуждение результатов исследования.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 15–17–10011.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва-растение. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – 220 с.
- Геохимические особенности элементного состава листьев тополя урбанизированных территорий / Д.В. Юсупов, Л.П. Рихванов, Н.В. Барановская, А.Р. Ялалтдинова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 6. – С. 25–36.
- Assessment of mercury content in poplar leaves of Novokuznetsk agglomeration / E.E. Lyapina, D.V. Yusupov, E.M. Tursunalieva, V.V. Osipova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – № 48 (1). – P. 012022.
- Радомская В.И., Радомский С.М., Юсупов Д.В., Моисеенко В.Г. Биоаккумуляция благородных металлов растениями // Доклады Академии наук. – 2003. – Т. 388. – № 1. – С. 93–96.
- Baker A.J.M. Accumulators and excluders strategies in the response of plants to heavy metals // J. Plant Nutr. – 1981. – V. 3. – № 1/4. – P. 643–654.
- Heavy metal stress in plants: from biomolecules to ecosystems // Ed. by M.N.V. Prasad. – Luxembourg: Springer Science & Business Media, 2013. – 461 p.
- Chibuikwe G.U., Obiora S.C. Heavy metal polluted soils: effect on plants and bioremediation methods // Applied and Environmental Soil Science. – 2014. – V. 2014. – P. 1–12.
- Rajewska I., Talarek M., Bajguz A. Brassinosteroids and response of plants to heavy metals action // Frontiers in plant science. – 2016. – V. 7. – P. 629.
- Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В. Тяжелые металлы и растения. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2014. – 197 с.

10. Колесникова (Горбатюк) Е.А., Барановская Н.В., Черненко Е.В. Региональные особенности элементного состава наземной части *Filipendula ulmaria* (Rosaceae) (юг Сибири) // Биогеохимия техногенеза и современные проблемы геохимической экологии: Труды IX Международной биогеохимической школы. – Барнаул, 2015. – Т. II. – С. 139–142.
11. Pukalskiene M., Venskutonis P.R., Pukalskas A. Phytochemical characterization of *Filipendula ulmaria* by UPLC/Q-TOF-MS and evaluation of antioxidant activity // Records of Natural Products. – 2015. – V. 9. – № 3. – P. 451–455.
12. Geochemical features of the elemental composition of meadowsweet (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim) in Kemerovo Oblast / V.A. Zhdanov, I.S. Sobolev, N.V. Baranovskaya, E.A. Kolesnikova (Gorbatyuk), E.V. Chernenkaya, A.R. Yalaltdinova. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. – № 1. – P. 012048.
13. Betula Pendula R. Leaves for the assessment of environmental pollution by metals around tailings from a gold deposit (Western Siberia, Russia) / D.V. Yusupov, T.S. Bolshunova, A.M. Mezhibor, L.P. Rikhvanov, N.V. Baranovskaya // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – 2017. – V. 17 (41). – P. 665–672.
14. Biogeochemical features of epiphytic lichens from the area of the tailing of a gold-polymetallic deposit (Kemerovo region, Russia) comparative to a reference area / T.S. Bolshunova, L.P. Rikhvanov, A.M. Mezhibor, N.V. Baranovskaya, D.V. Yusupov // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. – 2017. – V. 17 (51). – P. 165–172.
15. Yusupov D.V., Karpenko Yu.A. REE, Uranium (U) and Thorium (Th) contents in *Betula pendula* leaf growing around Komsomolsk gold concentration plant tailing (Kemerovo region, Western Siberia, Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43 (1) – P. 012053.
16. Атлас лекарственных растений России / под ред. В.А. Быкова. – М.: ВИЛАР, 2006. – 376 с.
17. In vitro and in vivo assessment of meadowsweet (*Filipendula ulmaria*) as anti-inflammatory agent / J. Katanić, T. Boroja, V. Mihailović, S. Nikles, S.P. Pan, G. Rosić, R. Bauer // Journal of ethnopharmacology. – 2016. – V. 193. – P. 627–636.
18. Юркевич Н.В., Бортникова С.Б., Саева О.П. Направления подземного и поверхностного стоков с хвостохранилищ горнорудного производства по данным геофизических и геохимических исследований // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 2. – № 2. – С. 305–310.
19. Формирование и источники питания россыпей Северо-Восточного Салаира / Г.В. Нестеренко, С.Р. Осинцев, Д.И. Портников и др. // Условия образования, принципы прогноза и поисков золоторудных месторождений. Труды ИГиГ. Новосибирск: Наука, 1983. – Вып. 533. – С. 166–194.
20. Черепнин В.К. К вопросу о составе и генезисе руд Урских месторождений Салаира // Известия Томск политехнического института. – 1958. – Т. 90. – С. 56–70.
21. Вертикальное и латеральное распространение высокоминерализованных растворов кислого дренажа по данным электротомографии и гидрогеохимии (Урской отвал, Салаир) / В.В. Оленченко, Д.О. Кучер, С.Б. Бортникова, О.Л. Гаскова, А.В. Еделев, М.П. Гора // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 4. – С. 782–795.
22. Формы миграции химических элементов из сульфидных отходов горнодобывающей промышленности / Н.В. Юркевич, О.Л. Гаскова, О.П. Саева, Т.В. Корнеева // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 2. – № 3. – С. 163–169.
23. Миграция тяжелых металлов (Cu, Pb, Zn, Fe, Cd) в ореоле рассеяния Урского хвостохранилища (Кемеровская область) / И.Н. Щербакова, М.А. Густайтис, Е.В. Лазарева, А.А. Богущ // Химия в интересах устойчивого развития. – 2010. – Т. 18. – С. 621–633.
24. Effect of drying methods on the phenolic constituents of meadowsweet (*Filipendula ulmaria*) and willow (*Salix alba*) / N. Harbourn, E. Marete, J.C. Jacquier, D. O'Riordan // LWT-Food Science and Technology. – 2009. – V. 42. – № 9. – P. 1468–1473.
25. Использование метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в элементном анализе объектов окружающей среды / В.К. Карандашев, А.Н. Туранов, Т.А. Орлова, А.Е. Лежнев, С.В. Носенко, Н.И. Золотарева, И.Р. Москвина // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – Т. 73. – № 1. – С. 12–22.
26. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4<sup>th</sup> ed. – USA, Boca Raton: CRC Press, 2011. – 505 p.
27. Глазовский Н.Ф. Техногенные потоки веществ в биосфере // Добыча полезных ископаемых и геохимия природных экосистем. – М.: Наука, 1982. – С. 7–28.
28. Перераспределение Au и Ag между отходами обогащения руд Ново-Урского месторождения и торфом в системе хвостохранилища / И.Н. Мягкая, Е.В. Лазарева, М.А. Густайтис, Б.Л. Щербов, С.М. Жмодик // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2014. – № 3. – С. 477–483.
29. Росляков Н.А., Кириллова О.В. Ртутное загрязнение окружающей среды при добыче золота в России // Химия в интересах устойчивого развития. – 1995. – Т. 3. – № 1–2. – С. 43–55.
30. Межибор А.М., Рихванов Л.П. Биогеохимическая характеристика мхов *Polytrichum commune* на территории Урского хвостохранилища в Кемеровской области // Безопасность в техносфере. – 2016. – Т. 5. – № 1. – С. 3–11.
31. Загрязнение ртутью окружающей среды после эксплуатации Ново-Урского золоторудного месторождения (Кемеровская область) / М.А. Густайтис, И.Н. Мягкая, Б.Л. Щербов, Е.В. Лазарева // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2016. – Т. 18. – С. 14–24.
32. Болгов Г.П. Сульфиды Салаира. Урская группа полиметаллических месторождений // Известия Томского индустриального института. – 1937. – Т. 58. – С. 45–96.
33. Мягкая И.Н. Минералого-геохимические особенности концентрирования золота органическим веществом в системе сульфидные отвалы – торф (на примере Урского хвостохранилища, Кемеровская область, Россия): автореф. дис. канд. геолого-минералогических наук. – Новосибирск, 2013. – 16 с.
34. Важенин И.Г. Корни растений как биоиндикатор уровня загрязненности почвы токсическими элементами // Агрохимия. – 1984. – № 2. – С. 73–77.

Поступила 18.10.2018 г.

#### Информация об авторах

**Горбатюк Е.А.**, аспирант кафедры геоэкологии и геохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Барановская Н.В.**, доктор биологических наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Жданов В.А.**, студент кафедры геоэкологии и геохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 581.1:574:550.4 (571.17)

## GEOCHEMICAL FEATURES OF THE *FILIPENDULA ULMARIA* (L.) MAXIM (ROSACEAE) ELEMENTAL COMPOSITION IN THE TERRITORY OF NOVO-URSKOE TAILING, KEMEROVO REGION

Ekaterina A. Gorbatyuk<sup>1</sup>,  
kolesnikovaea@tpu.ru

Natalia V. Baranovskaya<sup>1</sup>,  
nata@tpu.ru

Vadim A. Zhdanov<sup>1</sup>,  
hyfrvadim@gmail.com

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need for comprehensive information on the impact of biogeochemical background radical changes in the areas of mining enterprises tailings distribution. The research is aimed to predict routes of toxic components migration.

**The aim** of the research is to identify the changes in elemental composition of the root and overground sections of Meadowsweet (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.) and to determine indicators of the Novo-Urskoe deposit tailing's technogenic impact. The objective of the research is to determine coefficients of chemical elements concentrations relative to the background values as well as coefficients of the chemical elements accumulation in the root section of the meadowsweet in reference to overground one. Another objective of the research is to study the features of the spatial distribution of chemical elements in overground and root sections of meadowsweet in the tailing site.

**Methods.** Sampling was arranged on the flanks of Novo-Urskoe tailing. The elemental composition of meadowsweet was carried out by the certified methods using the technique of mass spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-MS) in the laboratory of the «Plasma» analytical center (Tomsk city). The analytical data processing was performed through Statistica 6.0 and Excel programs. Maps of elements distribution in overground and root sections were made using the programs: Surfer (11), CorelDRAW (16).

**Results.** Accumulation of 67 chemical elements in meadowsweet from Novo-Urskoe tailing in Kemerovo region was studied. Coefficients of element concentrations relative to the background and a Clark of the noosphere were calculated. The authors have compiled the geochemical ranks, showing accumulation of elements such as Zn, Ba, Pb, Tl, Se, Ag, W, Hg, Au, P, which exceed background values in 5 and more times. Maps of spatial distribution of chemical elements in meadowsweet showed that the highest concentrations of elements are in the area of the dump of oxidized ore processing and in the area of dispersion flux. The coefficients of accumulation of chemical elements in the root section of meadowsweet in reference to overground section were calculated. The authors identified the increased concentrations of chemical elements in the roots approximately in 80 % of cases.

### Key words:

Meadowsweet (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim.), chemical elements, Novo-Urskoe tailing, coefficients of concentrations, coefficients of accumulation.

The authors are grateful to L.P. Rikhvanov, Dr. Sc., professor, for organizing and assisting in carrying out expedition works and for discussion of the results of the research.

The research was supported by the grant of the Russian Science Fund no. 15-17-10011.

### REFERENCES

1. Ilin V.B. *Tyazhelye metally i nemetally v sisteme pochva–rastenie* [Heavy metals and non-metals in the soil-plant system]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2012. 220 p.
2. Yusupov D.V., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V., Yalaltdinova A.R. Geochemical features of poplar leaf elemental composition in urban areas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 6, pp. 25–36.
3. Lyapina E.E., Yusupov D.V., Tursunaliyeva E.M., Osipova V.V. Assessment of mercury content in poplar leaves of Novokuznetsk agglomeration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, no. 48 (1), pp. 012022.
4. Radomskaya V.I., Radomskij S.M., Yusupov D.V., Moiseenko V.G. Bioaccumulation of noble metals in plants. *Doklady Akademii Nauk*, 2003, vol. 388, no. 1, pp. 34–37.
5. Baker A.J.M. Accumulators and excluders strategies in the response of plants to heavy metals. *J. Plant Nutr.*, 1981, vol. 3, no. 1/4, pp. 643–654.
6. *Heavy metal stress in plants: from biomolecules to ecosystems*. Ed. by M.N.V. Prasad. Luxembourg, Springer Science & Business Media, 2013. 461 p.
7. Chibuike G.U., Obiora S.C. Heavy metal polluted soils: effect on plants and bioremediation methods. *Applied and Environmental Soil Science*, 2014, vol. 2014, pp. 1–12.
8. Rajewska I., Talarek M., Bajguz A. Brassinosteroids and response of plants to heavy metals action. *Frontiers in plant science*, 2016, vol. 7, pp. 629.
9. Titov A.F., Kaznina N.M., Talanova V.V. *Tyazhelye metally i rasteniya* [Heavy metals and plants]. Petrozavodsk, Karelsky nauchnyy centr RAN Publ., 2014. 197 p.
10. Kolesnikova (Gorbatyuk) E.A., Baranovskaya N.V., Chernenkaya E.V. Regionalnye osobennosti elementnogo sostava nadzemnoy chasti *Filipendula ulmaria* (Rosaceae) (yug Sibiri) [Regional features of the elemental composition of the aerial part of *Filipendula ulmaria* (Rosaceae) (southern Siberia)]. *Biogekhimiya tekhnigeneza i sovremennyye problemy geokhimicheskoy ekologii. Trudy IX Mezhdunarodnoy biogekhimicheskoy shkoly* [Proc. of the IX International Biogeochemical School: The Biogeochemistry of Technogenesis and Current Problems of Geochemical Ecology]. Barnaul, 2015. Vol. II, pp. 139–142.
11. Pukalskiene M., Venskutonis P. R., Pukalskas A. Phytochemical characterization of *Filipendula ulmaria* by UPLC/Q-TOF-MS and evaluation of antioxidant activity. *Records of Natural Products*, 2015, vol. 9, no. 3, pp. 451–455.

12. Zhdanov V.A., Sobolev I.S., Baranovskaya N.V., Kolesnikova (Gorbatyuk) E.A., Chernenkaya E.V., Yalaltdinova A.R. Geochemical features of the elemental composition of meadowsweet (*Filipendula ulmaria* (L.) Maxim) in Kemerovo Oblast. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43, no. 1, pp. 012048.
13. Yusupov D.V., Bolshunova T.S., Mezhibor A.M., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V. Betula Pendula R. Leaves for the assessment of environmental pollution by metals around tailings from a gold deposit (Western Siberia, Russia). *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2017, vol. 17 (41), pp. 665–672.
14. Bolshunova T.S., Rikhvanov L.P., Mezhibor A.M., Baranovskaya N.V., Yusupov D.V. Biogeochemical features of epiphytic lichens from the area of the tailing of a gold-polymetallic deposit (Kemerovo region, Russia) comparative to a reference area. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*, 2017, vol. 17 (51), pp. 165–172.
15. Yusupov D.V., Karpenko Yu.A. REE, Uranium (U) and Thorium (Th) contents in Betula pendula leaf growing around Komsomolsk gold concentration plant tailing (Kemerovo region, Western Siberia, Russia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43 (1), pp. 012053.
16. Bykov V.A. *Atlas lekarstvennykh rasteniy Rossii* [Atlas of medicinal plants of Russia]. Moscow, VILAR Publ., 2006. 376 p.
17. Katanić J., Boroja T., Mihailović V., Nikles S., Pan S. P., Rošić G., Bauer R. In vitro and in vivo assessment of meadowsweet (*Filipendula ulmaria*) as anti-inflammatory agent. *Journal of ethnopharmacology*, 2016, vol. 193, pp. 627–636.
18. Yurkevich N.V., Bortnikova S.B., Saeva O.P. Napravleniya podzemnogo i poverkhnostnogo stokov s khvostokhranilishch gornorudnogo proizvodstva po dannym geofizicheskikh i geokhimicheskikh issledovaniy [Directions of underground and surface runoff from tailings of mining production according to geophysical and geochemical studies]. *Interexpo Geo-Siberia*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 305–310.
19. Nesterenko G.V., Osintsev S.R., Portnikov D.I. Formirovaniye i istochniki pitaniya rossypsey Severo-Vostochnogo Salaira [Formation and power sources of placers of the North-Eastern Salair]. *Usloviya obrazovaniya, pribizpy prognoza i poiskov zolotorudnykh mestorozhdeniy. Trudy IGI* [Formation conditions, principles of forecasting and prospecting for gold deposits. IGG Proc.]. Vyp. 533, Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. pp. 166–194.
20. Cherepnin V.K. K voprosu o sostave i genezise rud Urskikh mestorozhdeniy Salaira [On the issue of composition and genesis of the ores of the Urskoye Salair deposits]. *Bulletin of Tomsk Polytechnic Institute*, 1958, vol. 90, pp. 56–70.
21. Olenchenko V.V., Kucher D.O., Bortnikova S.B., Gaskova O.L., Edelev A.V., Gora M.P. Vertikalnoe i lateralnoe rasprostraneniye vysokomineralizovannykh rastvorov kislogo drenazha po dannym elektrotomografii i gidrogeokhimii (Urskoy otval, Salair) [Vertical and lateral distribution of highly mineralized solutions of acidic drainage according to electro-tomography and hydrogeochemistry (Urskoy dump, Salair)]. *Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 4, pp. 782–795.
22. Yurkevich N.V., Gaskova O.L., Saeva O.P., Korneeva T.V. Formy migratsii khimicheskikh elementov iz sulfidnykh otkhodov gornodobyvayushchey promyshlennosti [Forms of migration of chemical elements from sulphide mining waste]. *Interexpo Geo-Siberia*, 2014, vol. 2, no. 3, pp. 163–169.
23. Shcherbakova I.N., Gustaytis M.A., Lazareva E.V., Bogush A.A. Migratsiya tyazhelykh metallov (Cu, Pb, Zn, Fe, Cd) v oreole rasseyaniya Urskogo khvostokhranilishcha (Kemerovskaya oblast) [Migration of heavy metals (Cu, Pb, Zn, Fe, Cd) in the aureole of Ursk tailing (Kemerovo region)]. *Chemistry for sustainable Development*, 2010, vol. 18, pp. 621–633.
24. Harbourne N., Marete E., Jacquier J.C., O'Riordan D. Effect of drying methods on the phenolic constituents of meadowsweet (*Filipendula ulmaria*) and willow (*Salix alba*). *LWT-Food Science and Technology*, 2009, vol. 42, no. 9, pp. 1468–1473.
25. Karandashev V.K., Turanov A.N., Orlova T.A., Lezhnev A.E., Nosenko S.V., Zolotareva N.I., Moskvina I.R. Ispolzovanie metoda mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy v elementnom analize obektov okruzhayushchey sredy [Using inductively coupled plasma mass spectrometry in elemental analysis of environmental objects]. *Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 2007, vol. 73, no. 1, pp. 12–22.
26. Kabata-Pendias A. *Trace Elements in Soils and Plants*. 4<sup>th</sup> ed. BocaRaton, USA, CRC Press, 2011. 505 p.
27. Glazovskiy N.F. Tekhnogennyye potoki veshchestv v biosfere [Technogenic flows of substances in the biosphere]. *Dobycha poleznykh iskopayemykh i geokhimiya prirodnykh ekosistem* [Mining and geochemistry of natural ecosystems]. Moscow, Nauka Publ., 1982. pp. 7–28.
28. Myagkaya I.N., Lazareva E.V., Gustaytis M.A., Shcherbov B.L., Zhmodik S.M. Pereraspredeleniye Au i Ag mezhdru otkhodami obogashcheniya rud Novo-Urskogo mestorozhdeniya i torfom v sisteme khvostokhranilishcha [Au and Ag redistribution between the ore dressing waste of the Novo-Ursky deposit and peat in the tailings system]. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2014, no. 3, pp. 477–483.
29. Roslyakov N.A., Kirillova O.V. Rtutnoye zagryazneniye okruzhayushchey sredy pri dobyche zolota v Rossii [Mercury Pollution in Gold Mining in Russia]. *Chemistry for Sustainable Development*, 1995, vol. 3, no. 1–2, pp. 43–55.
30. Mezhibor A.M., Rihvanov L.P. Biogeokhimicheskaya kharakteristika mkhov Polytrichum commune na territorii Urskogo khvostokhranilishcha v Kemerovskoy oblasti [Biogeochemical characteristics of moss Polytrichum commune in the territory of the Ursky tailing dump in the Kemerovo region]. *Safety in the technosphere*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 3–11.
31. Gustaytis M.A., Myagkaya I.N., Shcherbov B.L., Lazareva E.V. Zagryazneniye rtuty okruzhayushchey sredy posle ekspluatatsii Novo-Urskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Kemerovskaya oblast) [Environmental pollution by mercury after the operation of the Novo-Ursky gold deposit (Kemerovo region)]. *News of Irkutsk State University. Seriya: Nauki o Zemle*, 2016, vol. 18, pp. 14–24.
32. Bolgov G.P. Sulfidy Salaira. Urskaya gruppa polimetallicheskh mestorozhdeniy [Salair sulfides. Urskaya group of polymetallic deposits]. *News of the Tomsk Industrial Institute*, 1937, vol. 58, pp. 45–96.
33. Myagkaya I.N. *Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti kontsentrirovaniya zolota organicheskim veshchestvom v sisteme sulfidnykh otvaly – torf (na primere Urskogo khvostokhranilishcha, Kemerovskaya oblast, Rossiya)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Mineralogical and geochemical features of gold concentration by organic matter in the system sulphide dumps – peat (on the example of the Ursky tailing, Kemerovo Region, Russia). Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2013. 16 p.
34. Vazhenin I.G. Kornii rasteniy kak bioindikator urovnya zagryaznenosti pochvy toksicheskimi elementami [Plant roots as a bio-indicator of soil contamination level by toxic elements]. *Agrochemistry*, 1984, no. 2, pp. 73–77.

Received: 18 October 2018.

#### Information about the authors

**Ekaterina A. Gorbatyuk**, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Natalia V. Baranovskaya**, Dr. Sc, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vadim A. Zhdanov**, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.831

## ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫЕ КАТАСТРОФЫ КАК ПРОЯВЛЕНИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Борисов Константин Иванович<sup>1</sup>,  
kibor1956@gmail.com

Горшков Лев Капитонович<sup>2</sup>,  
maneb@mail.ru

Софьин Алексей Петрович<sup>2</sup>,  
as-114@yandex.ru

Федорова Людмила Анатольевна<sup>2</sup>,  
kingalya@mail.ru

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10.

<sup>2</sup> Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы,  
Россия, 199026, г. Санкт-Петербург, 26 линия Васильевского острова, 9.

**Актуальность.** Геодинамическая неустойчивость – причина многих природных катастроф: землетрясений, извержений вулканов, оползней, цунами. Природные катастрофы могут инициировать техногенные аварии (обрушения зданий и сооружений, взрывы на шахтах, нарушения целостности плотин и др.) и, наоборот, техногенные процессы могут вызывать появление новых природных объектов, например, с ними связано создание искусственных водохранилищ. Широко распространенная в мире добыча нефти и газа может провоцировать подвижки в земной коре с трагическими последствиями. Особенности условий для активизации геодинамической неустойчивости определяют уровень безопасности персонала технических объектов и качество эксплуатации сооружений, систем и агрегатов. Случайный характер процессов в земной коре в значительной мере формирует возможность прогнозирования техногенных катастроф и проведения мероприятий для парирования негативных факторов, связанных, в том числе, с безопасностью персонала и населения. Рекомендации по предупреждению и прогнозу природно-техногенных катастроф и условия их возникновения основаны на сопоставлении различных точек зрения на активизацию геодинамической неустойчивости Земли, а также выявлении степени влияния на нее сезонной периодичности характерных процессов. Обоснован уровень значимости параметров движения Земли в формировании условий активизации геодинамической неустойчивости. Однако, современное состояние вопроса диктует необходимость дополнительных исследований в данной области, что частично восполняет данная статья.

**Цель:** определить и предложить вариант подхода к анализу условий возникновения катастрофической ситуации.

**Объекты:** геодинамические процессы в земной коре и варианты комбинаций условий для их возникновения.

**Методы:** обзор и анализ существующей научно-технической информации по проблеме геодинамической неустойчивости земной коры и постановка задач исследований.

**Результаты.** Выявлены и обоснованы причины возникновения аварийных ситуаций, связанных с геодинамическими процессами в земной коре.

### Ключевые слова:

Геодинамическая неустойчивость, земная кора, экзогенные и эндогенные процессы, пульсационная гипотеза, природно-техногенные катастрофы, техногенные аварии, импульс силы, период, закон И. Кеплера, ротационно-импульсный режим.

### Введение

Вопросы размещения и успешной эксплуатации объектов наземной инфраструктуры неразрывно связаны с устойчивостью зданий и сооружений в зонах земной коры с высокой вероятностью природных и техногенных катастроф. Анализ основных причин возникновения условий разрушения или повреждения технических, стартовых и иных сооружений показал необходимость исследования процессов в земной коре, имеющих, чаще всего, выраженную географическую привязку и сезонный характер. Вопросам исследования причин возникновения природных и антропогенных катастроф посвящены труды многих ученых [1–5], в которых показано, что видимые и поддающиеся

изучению природные и техногенные катастрофы случаются в земной коре благодаря сложному взаимодействию внутренних (эндогенных) и поверхностных или приповерхностных (экзогенных) процессов. Причем первые процессы создают крупные неровности рельефа тектонического и вулканического происхождения, а вторые стремятся сгладить их путем разрушения выступов на поверхности (денудация) или заполнения понижений осадками (аккумуляция).

Геодинамика как наука о глубинных силах и процессах [6, 7], определяющих движение масс вещества и энергии внутри Земли и в ее внешних оболочках (в первую очередь, в литосфере и гидросфере), исследует сокращение, расширение или

попеременное изменение радиуса Земли, что является основой пульсационной гипотезы академика В.А. Обручева и американского геолога У. Бачера.

Многочисленные колебания объема Земли (пульсации) являются причинами периодического возрастания деформаций сжатия и расширения как самой земной коры, так и подвижных ее зон, усиления вулканизма, возникновения трансгрессий и регрессий мирового уровня, следствиями которых становятся природные катастрофы: землетрясения различных интенсивностей и масштабов, вулканические извержения, перемещения и изменения внутренней структуры участков или блоков земной коры (тектонические нарушения), а также метаморфические процессы под влиянием повышенных температур и давлений [8].

Все перечисленные процессы и определяют геодинамическую неустойчивость и ее связь с природно-техногенными катастрофами. При этом природные катастрофы нередко перемежаются с техногенными. Последние довольно часто могут выступать в роли пусковых толчков для природных, а сами природные катастрофы (например, связанные с пульсационными процессами) могут провоцировать и дополнять техногенные катастрофы. Конечно, природные катастрофы типа землетрясений, извержений вулканов, оползней, селей невозможно не только предсказать, но и тем более предотвратить. Нельзя при этом не отметить и тот факт, что часто роль природных факторов игнорируется при анализе техногенных катастроф, например, в горнодобывающей промышленности, в энергетике, при строительстве протяженных нефте- и газопроводов и т.п.

Пульсации объема земной коры вызывают геодинамическую неустойчивость, согласно выводам М.В. Стоваса [9], главным образом, в широтных поясах вследствие колебаний величины скорости движения Земли по плоской эллиптической орбите вокруг Солнца в резонансе с прецессией земной оси. Одним из таких поясов геодинамической неустойчивости можно назвать полосу  $51^{\circ}$ – $54^{\circ}$  с.ш., в которой сравнительно недавно имели место трагические события [10, 11], например: гидроразрыв сети водоснабжения в г. Саратове ( $46^{\circ}$  в.д.); авария на Саяно-Шушенской ГЭС ( $92^{\circ}$  в.д.); активизация вулканов Шивелуча, Ключевского и Карымского на Камчатке (около  $161^{\circ}$  в.д.). Геодинамически неустойчивые пояса возникают, в соответствии с высказанной выше гипотезой того же М.В. Стоваса, из-за изменений потенциала деформирующих земную кору сил. Кроме того, неустойчивость может быть инициирована и солнечным излучением, аномалиями гравитации, магнитных и электромагнитных процессов, акустической эмиссией и т.п.

#### Влияние природных условий

На особенности развития геодинамических процессов накладывается широкий спектр природных условий нашей страны [11, 12]. Природная геодинамическая неустойчивость земной коры мо-

жет проявляться не только в виде катастрофических землетрясений и им подобных процессов, но и как «спокойная» природная саморегуляция напряженного состояния: подвижки пластичных пород, незначительные до определенного уровня; вертикальные смещения блоков с заполнением образовавшихся пустот водотоками, а также тектонические оперения крупных разломов и сдвигов. Эти, на первый взгляд, незаметные явления могут спровоцировать и техногенные аварии, и даже катастрофы: гидроудар в Саратове мог быть вызван микробросом в несущем блоке горных пород; технические просчеты при проектировании Саяно-Шушенской ГЭС с высокой долей вероятности могли быть усилены «спокойным» пластическим смещением пород фундаментов, опор, отдельных блоков ГЭС; дискутируемый в средствах массовой информации и в научной литературе поворот сибирских рек на юг способен вызвать дисбаланс количества движения планеты из-за усиления ее анизотропности.

Список произошедших, а также возможных в будущем аварий и катастроф по причине естественной и наведенной (техногенной) геодинамической неустойчивости можно продолжать и далее, но вывод из всего сказанного очевиден: необходимо учитывать естественную и наведенную напряженность в земной коре при строительстве крупных наземных, подземных, акваториальных и подводных объектов, а также изменение этой напряженности при сооружении подземных газо- и водохранилищ, плотин, дамб, атомных станций, хранилищ ядерных отходов и др., с тем, чтобы обеспечить их безопасную, для людей и природы, эксплуатацию, эффективные безаварийные технологии, отталкиваясь от природных факторов. Сравнение уровней естественной напряженности в земной коре, соответствующей проявлениям глобальной геодинамической неустойчивости, например, с давлением в глубоких геотермальных скважинах или, особенно, в скважинах на нефтегазовых промыслах, свидетельствует о близком порядке их количественных значений. Все сказанное подтверждает настоятельную необходимость прогнозировать последствия от быстро расширяющейся в своих масштабах утилизации глубинных энергоносителей (нефти, газа, парогидротерм) как негативного воздействия на геодинамический режим земной коры.

О причинах пульсаций объема Земли как неустойчивой геодинамической системы существует достаточно много мнений, суть некоторых из них рассмотрим ниже, хотя об одной (гипотезе М.В. Стоваса) уже говорилось. Астроном Н.Н. Парийский полагал [13], что пульсация объема Земли вызывается изменениями ее средней температуры, зависящей от разности расстояний между Землей и Солнцем в перигелии и афелии. Так, по его расчетам, при разности средних температур Земли в марте и августе в  $1,4^{\circ}\text{C}$  изменение радиуса Земли составляет  $0,092$  м, что представляется несуществен-

ным по сравнению с размерами не только самой Земли, но даже и с толщиной земной коры.

По мнению академика В.А. Амбарцумяна [14], причиной пульсаций объема Земли является ее периодическое переуплотнение из-за разности напряженностей гравитационного и электромагнитного полей, в пределах которых совершается движение всех космических тел. Эта гипотеза достаточно реалистична, имеет право на существование, но не снимает трудностей при ее практическом использовании для прогноза земных катастроф и их предупреждения. Пульсационная теория изменения объема Земли получила широкое распространение [15, 16].

Кроме того, есть точка зрения, приведенная в работе [6], объясняющая пульсации объема Земли как планеты фазовыми переходами слагающего ее вещества в процессе эволюции. Но эволюция – процесс, насчитывающий миллиарды лет, поэтому представляется проблематичным использование ее законов для решения практических задач в настоящее, конкретное время. Более того, до сих пор не ясно внутреннее строение самой планеты, как и механизм фазовых переходов веществ, образующих внутреннюю структуру Земли.

Таким образом, независимо от природы пульсаций объема Земли реальность этой пульсации доказана, как полагает тектонист Е.Е. Милановский [17], и это нужно учитывать и использовать на практике. Наряду с пульсацией необходимо отметить еще один режим, определяющий геодинамическую неустойчивость Земли, – ротационный режим ее движения, реальность которого подтверждена в середине прошлого века одновременно тремя службами времени: Парижской (1934–1947), Гринвичской (1933–1949) и Берлинской (1938–1945).

Хотя термин «ротационный режим» ввел в механику не Иоганн Кеплер, но именно он дал первые объяснения по этому поводу в своих законах: в первом законе Кеплер показал, что Земля и другие планеты солнечной системы движутся не по круговым (как предполагал Н. Коперник), а по эллиптическим орбитам; согласно второму закону, при движении планет по эллиптическим орбитам радиус-векторы планет за равные промежутки времени описывают равноплощадные сектора; третий закон, хотя и не имеет такого значения, как два первых закона, позволяет определить некоторые характеристики небесных тел, например, их массы, принимая массу Солнца за единицу.

Сущность ротационного движения Земли объясняется законом сохранения ее количества движения. Сила притяжения Земли к Солнцу является, согласно определению, приводимому в курсе теоретической механики, центральной силой, то есть силой, линия действия которой всегда проходит через определенный центр, в нашем случае, через фокус эллиптической орбиты Земли, в котором находится Солнце. Это значит, что момент этой центральной силы относительно фокуса (Солнца) равен нулю, и тогда вектор момента коли-

чества движения Земли относительно названного фокуса ( $\vec{K}_S$ ) является постоянной величиной.

Модуль этого вектора является постоянной величиной и равен скалярному произведению

$$K_S = mvh,$$

где  $m$  – масса Земли;  $v$  – ее линейная скорость;  $h$  – расстояние от Земли до Солнца, меняющееся от минимума в перигелии до максимума в афелии (рис. 1).

Постоянство модуля вектора момента количества движения Земли относительно названного фокуса ( $\vec{K}_S$ ) обеспечивается изменением скорости  $v$  при изменении величины  $h$ . Таким образом, радиус-вектор  $\vec{r}$  Земли по отношению к Солнцу описывает за определенное время равные сектора (заштрихованные площадки на рисунке, где  $r_1 \leq r \leq r_2$ ), что определяет закон площадей, частным случаем которого является второй закон Кеплера:

$$v_1 h_1 = v_2 h_2,$$

где  $h_1 = SM_1$ ;  $h_2 = SM_2$  (рис. 1).

Практически это означает, что вблизи Солнца (в перигелии) Земля движется быстрее, чем в афелии. Чтобы обеспечить этот эффект, рост скорости движения Земли в перигелии должен компенсироваться уменьшением угловой скорости ее вращения. Такого же рода компенсация должна иметь место и в афелии, но с обратным знаком.

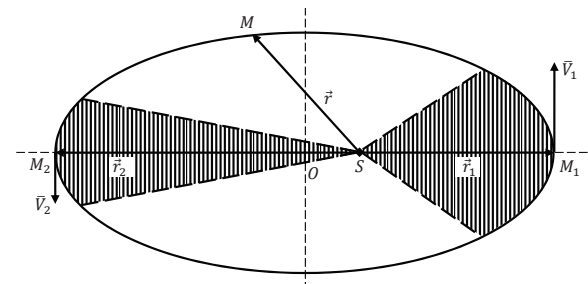


Рис. 1. Схема, поясняющая второй закон И. Кеплера (заштрихованные участки имеют равные площади)

Fig. 1. Scheme explaining the second law of I. Kepler (shaded regions have equal area)

Снижение скорости движения планеты по орбите восполняется увеличением угловой скорости вращения. В этом и заключается суть ротационного движения Земли, также оказывающего свое влияние на изменение объема планеты.

#### Проявления геодинамической неустойчивости

Беглый анализ временных границ проявления техногенных катастроф и крупных аварий показывает [17–32], что чаще всего они приурочиваются к периоду между серединой августа одного года и серединой-концом марта следующего года, то есть примерно семь месяцев, о чем уже говорилось в связи с определением средних температур Земли в марте и августе. К этому же периоду приурочиваются и крупные природные катастрофы: в течение названных семи месяцев в XX в. происходило в

разные годы более трех четвертей крупных и масштабных по разрушениям и жертвам населения землетрясений [18].

Объяснение активизации геодинамической неустойчивости Земли в период с августа по март (с соответствующим увеличением количества и масштабов катастроф) дается в информации уже упоминавшихся трех европейских служб времени: именно в этот период продолжительность суток увеличивается [13] на 0,0024 с. Для обычного восприятия эта величина представляется ничтожно малой, но в масштабах земного шара она оказывает существенное влияние на геодинамический режим движения Земли. Таким образом, можно с полным основанием говорить о ротационно-пульсационном режиме существования нашей планеты, тем более что первопричиной ротации является периодическое изменение радиуса Земли как вращающегося тела. Термин «ротационно-пульсационный режим» впервые предложил Г.Н. Каттерфельд [20], который, в свою очередь, выдвинул и свою версию неравномерности суточного вращения Земли, а именно, неравномерность разогрева планеты в процессе ее гравитационного уплотнения.

Увеличение длительности суток в период с августа по март влечет за собой приращение импульса силы тяготения между Землей и Солнцем, определяющей движение Земли по своей орбите. Согласно закону о сохранении количества движения, его приращение равно приращению импульса силы, вызывающей движение. Можно допустить и обратную трактовку: приращение импульса силы равно приращению количества движения:

$$\Delta S = \Delta Q,$$

где  $\Delta S$  – приращение импульса силы, равное

$$\Delta S = F \Delta t,$$

где  $F$  – сила притяжения Земли к Солнцу;  $\Delta t$  – приращение продолжительности суток;  $\Delta Q$  – приращение количества движения:

$$\Delta Q = m \Delta v,$$

где  $\Delta v$  – приращение скорости, которое равно  $\Delta v = \omega \Delta R$ ;  $\omega$  – угловая скорость вращения;  $\Delta R$  – приращение радиуса Земли или расширение толщины земной коры.

Таким образом, в период с августа одного года по март следующего года Земля увеличивается в своих размерах, что сопровождается расширением земной коры с активизацией вулканизма, ростом числа землетрясений, расширением тектонических разломов и увеличением числа и степени раскрытости трещин в блоках горных пород.

В другой период года (с марта по август) процесс идет в обратном направлении: радиус Земли сокращается из-за уменьшения импульса силы тяготения к Солнцу, земная кора сжимается с закрытием малых трещин и уменьшением раскрытости крупных, в том числе и разломов, снижается тек-

тоническая активность, уменьшаются количество и масштабы землетрясений и проявлений вулканизма (рис. 2).

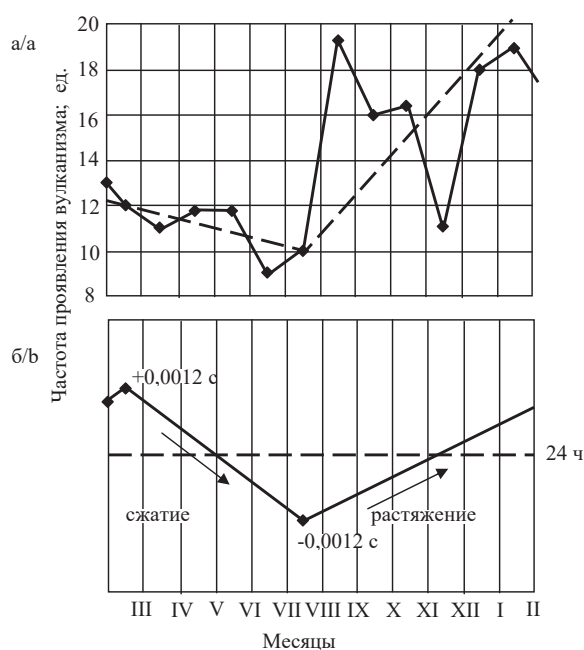


Рис. 2. Изменение интенсивности вулканизма (а) и длительности суток (б) по месяцам года: --- усредненная интенсивность; точки – статистические данные

Fig. 2. Changes in volcanism intensity (a) and day duration (b) by the months of the year: --- the average intensity; points – statistics

Чтобы оценить степень влияния процессов расширения и сжатия земной коры, следует помнить, что горные породы имеют прочность на растяжение в 20–50 раз ниже прочности на сжатие. Поэтому период расширения земной коры в течение года наиболее опасен, так как именно на этот период приходится большинство как природных, так и техногенных катастроф с высокой степенью их повторяемости. Этим, например, можно объяснить возникновение с малым промежутком одна за другой двух крупных аварий на шахте «Ветка Глубокая» им. А.Ф. Засядько в Донбассе: прорыв аномальных количеств метана, взрыв его вместе с угольной мелочью, пожар, обрушение выработок с трагическими последствиями.

### Заключение

Все шахты Центрального Донбасса, а упоминаемая шахта в особенности, отличаются повышенной загазованностью, увеличивающейся с глубиной горных работ. Шахта им. А.Ф. Засядько имеет глубину более 1200 м, что соответствует верхним горизонтам Прикарпатской нефтегазоносной провинции. При расширении литосферы в этом регионе, да и в соседних тоже, усиливается макро- и микротрещиноватость слагающих разрез этой провинции горных пород, в результате чего открываются дополнительные пути миграции углеводоро-

дов, метана в том числе, масштабы которой, по мнению И.М. Губкина [19], могут характеризоваться гигантскими расстояниями, сравнимыми с расстоянием от Карпат до Центрального Донбасса.

Если бы геологическая служба шахты им. А.Ф. Засядько обращала более серьезное внимание на периодичность проявления аномальной газообильности в очистных забоях и подготовительных выработках, то можно было бы и применить специальные меры по предупреждению аварий или, по крайней мере, снижению масштаба их последствий: усиление вентиляции; сокращение добычи угля вплоть до временного прекращения деятельности шахты в опасный период с августа по март.

Таким образом, уровень геодинамической стабильности Земли, особенно в пределах земной коры, налагает особые требования:

- к качеству организации деятельности отраслей промышленности, связанных с проникновением в недра Земли и масштабным строительством;
- учету возможности возникновения природных катастроф, обычно сопровождаемых техногенными авариями;
- объему профилактических мероприятий по полному предупреждению или снижению уровня последствий таких катастроф и аварий.

Предполагаемый значительный объем экономических затрат позволит парировать отрицательное воздействие природных факторов на объекты природы, обеспечить безаварийность работы предприятий и организаций, а также снизить социальные расходы в отношении пострадавших и уровень издержек на аварийно-восстановительные работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сагалович О.И. Хроника глобальных катастроф. Бинарная геодинамика. – Санкт-Петербург: Недра, 2003. – 225 с.
2. Байда С.Е. Природные, техногенные и биолого-социальные катастрофы: закономерности возникновения, мониторинг и прогнозирование. – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций Министерства чрезвычайных ситуаций России, федеральный центр науки и высоких технологий, 2013. – 194 с.
3. Хлебопрос Р.Г., Фет А.И. Природа и общество: модели катастроф. – Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999. – 344 с.
4. Головнев А. Крупнейшие атомные аварии (экономика, управление, инновации). Сводка крупнейших атомных аварий с сентября 1944 г. по март 2011 г. // Экология и жизнь. – 2011. – № 4. – С. 39–40.
5. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Потапов И.И., Солдатов В.Ю. Природные катастрофы и окружающая среда // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2012. – Вып. 1. – С. 3–162.
6. Аплонов С.В. Геодинамика. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета, 2001. – 360 с.
7. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. – М.: Изд-во Московского государственного университета, 1995. – 480 с.
8. Деменецкая Р.М. Кора и мантия Земли. – М.: Недра, 1985. – 256 с.
9. Стовас М.В. Избранные труды. Ч. 1. – М.: Недра, 1975. – 156 с.
10. Веселовский В.А., Платэ А.Н. Вулканическая активность полуострова Камчатки // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2010. – Вып. № 5. – С. 104–107.
11. Тарасов В. Саяно-Шушенская авария: факты и гипотезы // Наука и жизнь. – 2013. – № 7. – С. 18–30.
12. География. Современная иллюстрированная энциклопедия / под ред. А.П. Горкина. – М.: Росмэн-Пресс, 2006. – 624 с.
13. Парийский Н.Н. Изменение длины суток и деформаций Земли // Астрономический журнал. – 1945. – Т. 22. – Вып. 2. – С. 89–96.
14. Амбарцумян В.А. (Название статьи не афишируется) // Известия Академии Наук Армянской Советской Социалистической Республики. – 1958. – Т. 11. – № 9. – С. 91–109.
15. Гришанков Г.Е. Литосфера: структура, функционирование, эволюция. – Симферополь: Оригинал-М, 2008. – 448 с.
16. Милановский Е.Е. Пульсационная гипотеза геотектоники, ее становление и значение для понимания закономерностей Земли // Научное наследие М.А. Усова и его развитие. – Новосибирск: Наука, 1984. – С. 107–141.
17. Милановский Е.Е. Пульсация и расширение Земли – возможный ключ к пониманию её тектонического развития и вулканизма в фанерозое // Природа. – 1978. – № 7. – С. 20–27.
18. Белоусов В.В., Шандер Е.В. Геодинамические процессы и основные черты структуры земной коры // Большая Советская энциклопедия. Т. 9. – М.: Советская энциклопедия, 1972. – С. 482–483.
19. Одесский И.А., Декусар З.Б. Об одной из причин природных катастроф // Экология и развитие общества: Сборник материалов XIII Международной научно-практической конференции. – СПб.: МАНЭБ, 2008. – С. 48–56.
20. Unusual Rock Mechanics Challenges Encountered During Construction of a Large Dam / C. Vibert, A. Azeb, S. Ianos, E. Mine // Rock Mechanics for Global Issues: 8<sup>th</sup> Asian Rock Mechanics Symposium. – Japan, Sapporo: Japanese Committee for Rock Mechanics, October 2014. – P. 2085–2095.
21. Ware K., Westion J.F., Dickinson J.A. Investigation of a Canyon System off Cote D'Ivoire to Determine Present Day Risk of Slope Instability for a Field Development // SUT Conference Paper. – UK, 2012. – P. 543–550.
22. Sharra L., Bozo L., Allkja S. Unstable rock masses in the highway Durres-Prishtina // Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on. – London: Taylor & Francis Group, 2014. – P. 1171–1774.
23. Zhang Yujie, Wang Yanqiu, Jaiswal Priyank. A Model for Propagation of Tensile Fractures in Heterogeneous Natural Media // SEG Conference Paper. – USA: New Orleans Annual Meeting, 2015. – P. 5174–5178. URL: <http://dx.doi.org/10.1190/segam2015-5930036.1> (дата обращения 25.04.2019).
24. Hamed Berimani, Homayoon Khoshrovan. Caspian Sea Southern Coasts Seismic Vulnerability // International offshore and Polar Engineering Conference. – USA, Hawaii, 19–24 June, 2011. – P. 660–664.
25. Delineation of Gravitational Instability Induced by Gas Charges into Oil Reservoirs Using Diffusion and Flory-Huggins-Zuo Equations / J.Y. Zuo, Sh. Pan, K. Wang et al. // SPE Conference Paper. – Australia, Perth, 25–27 October, 2016. – P. 546–559.
26. Geomechanics in Unconventional Reservoir: a New Approach to Drilling Integrating Advanced Acoustic Measurements and Formation Evaluation / C. Chatterjee, A. Reyes et al. // SPE Conference Paper. – Australia, Brisbane, 23–25 October, 2018. – P. 42–60.
27. Landscape Transformation Associated to the Development of Camisea Project and the Effectiveness of the Off Shore in Land Ap-

- proach / G. Leunda, G. Dias, E. Mendoza, N. Capello // SPE Conference Paper. – Argentina, Buenos Aires, 18–19 May, 2017. – P. 58–67.
28. The Critical Role of Asphaltene Gradients and Data Integration in Reservoir Fluid Geodynamics Analysis / O.C. Mullins, H. Dumont et al. // SPE Conference Paper. – USA, Texas, San Antonio, 9–11 October, 2017. – P. 543–563.
29. Chen G., Kawakami T., Zhang Y. Mechanism analysis of earthquake Induced Extreme Motions: Clarifying Extreme Acceleration // Proc. of 51<sup>st</sup> US Rock Mechanics. Geomechanics Symposium. – California, San Francisco: American Rock Mechanics Association, 25–28 June, 2017. – P. 426–432.
30. Azhari A., Ozbay U. Evaluating the Effect of Earthquakes on Open Pit Mine Slopes // Proc. of 50<sup>th</sup> Rock Mechanics. Geomechanics Symposium. – Texas, Houston: American Rock Mechanics Association, 26–29 June, 2016. – P. 315–324.
31. Williams-Stroud S.C. Earth Stress and Seismic Hazard from the Size-Frequency Distribution of Seismic Events // Proc. of 51<sup>st</sup> Rock Mechanics. Geomechanics Symposium. – California, San Francisco: American Rock Mechanics Association, 25–28 June, 2017. – P. 544–550.
32. Williams-Stroud S.C. A geological approach to seismicity b-values: Implications for hazard assessment // Proc. of SEG International Exposition and 87<sup>th</sup> Annual Meeting. – USA, Texas, Houston, 2017. – P. 5381–5385.

*Поступила 29.04.2019 г.*

### **Информация об авторах**

**Борисов К.И.**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой бурения нефтяных и газовых скважин Сибирского федерального университета.

**Горшков Л.К.**, заслуженный деятель науки Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, вице-президент Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы.

**Софьин А.П.**, кандидат технических наук, доцент, доцент Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы.

**Федорова Л.А.**, кандидат технических наук, доцент, доцент Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы.

UDC 622.831

## NATURAL-TECHNOLOGICAL DISASTERS AS MANIFESTATIONS OF GEODYNAMIC INSTABILITY OF THE EARTH'S CRUST

Konstantin I. Borisov<sup>1</sup>,  
kibor1956@gmail.com

Lev K. Gorshkov<sup>2</sup>,  
maneb@mail.ru

Alexey P. Sofin<sup>2</sup>,  
as-114@yandex.ru

Lyudmila A. Fedorova<sup>2</sup>,  
kingalya@mail.ru

<sup>1</sup> Siberian Federal University,  
79/10, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia.

<sup>2</sup> International Academy of Sciences of ecology, human and nature safety,  
9, 26 line of Vasilievsky island, St. Petersburg, 199026, Russia.

**The relevance.** Geodynamic instability is the cause of many natural disasters: earthquakes, volcanic eruptions, landslides, tsunamis. Natural disasters can trigger man-made accidents (collapse of buildings and structures, explosions in mines, dam integrity violations, etc.) and, conversely, man-made processes can cause the emergence of new natural objects, for example, they are associated with the creation of artificial reservoirs. The widespread oil and gas production in the world can provoke movements in the earth's crust with tragic consequences. The features of conditions for activation of geodynamic instability determine the level of safety of personnel of technical facilities and the quality of operation of facilities, systems and units. The random nature of the processes in the earth's crust to a large extent forms the possibility of predicting man-made disasters and measures to parry the negative factors associated, including the safety of personnel and the population. Examples of natural and man-made disasters and the conditions of their occurrence as well as the recommendations for their prevention and prediction are given. Different points of view on activation of hemodynamic instability of the Earth, as well as the influence of seasonal periodicity of characteristic processes on it were compared. The level of significance of the earth motion parameters in the formation of the conditions of activation of geodynamic instability is substantiated. The relevance lies in the need for additional research in this area, which is partially filled by this article.

**The aim** of the research is to identify and propose an approach to analyze the catastrophic situation conditions.

**Objects:** geodynamic processes in the earth's crust and variants of combination of conditions for their occurrence.

**Methods:** review and analysis of existing scientific and technical information on the problem of geodynamic stability of the earth's crust and formulation of research tasks.

**Results.** The causes of emergency situations associated with geodynamic processes in the earth's crust are identified and justified.

### Key word:

Geodynamic instability, crust, exogenous and endogenous processes, pulsation hypothesis, natural and technogenic catastrophes, technogenic accidents, force impulse, period, I. Kepler's law, rotational-impulse regime.

### REFERENCES

1. Sagalovich O.I. *Khronika globalnykh katastrof. Binarnaia geodinamika* [Chronicle of global catastrophes. Binary geodynamics]. St-Petersburg, Nedra Publ., 2003. 225 p.
2. Baida S.E. *Prirodnye, tekhnogennye i biologo-sotsialnye katastrofy: zakonomernosti vozniknoveniya, monitoring i prognozirovaniye* [Natural, technogenic and biological-social disasters: patterns of occurrence, monitoring and forecasting]. Moscow, VNII GOCHS (FC) Publ., 2013. 194 p.
3. Khlebopros R.G., Fet A.I. *Priroda i obshchestvo: modeli katastrof* [Nature and society: models of catastrophes]. Novosibirsk, Siberian chronograph Publ., 1999. 344 p.
4. Golovnev A. Major nuclear accidents (Economics, management, innovation). Summary of the largest nuclear accidents from September 1944 to March 2011. *Ecology and life*, 2011, no. 4, pp. 39–40. In Rus.
5. Bondur V.G., Kravivin V.F., Potapov I.I. Natural disasters and the environment. *Problems of the environment and natural resources*, 2012, Iss. 1, pp. 3–162. In Rus.
6. Aplonov S.V. *Geodinamika* [Geodynamics]. St-Petersburg, State university Publ., 2001. 360 p.
7. Khain V.E., Lomize M. G. *Geotektonika s osnovami geodinamiki* [Geotectonics with bases of geodynamics]. Moscow, Moscow state University Publ., 1995. 480 p.
8. Demenitskaya R.M. *Kora i mantiya Zemli* [Crust and mantle of the Earth]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 256 p.
9. Stovas M.V. *Izbrannye trudy* [Selected works]. P. 1. Moscow, Nedra Publ., 1975. 156 p.
10. Veselovsky V.A. Vulkanicheskaya aktivnost poluostrova Kamchatki [Volcanic activity of the Kamchatka Peninsula]. *Problems of environment and natural resources*, 2010, Iss. 5, pp. 104–107.
11. Tarasov V. Sayano-Shushenskaya accident: facts and hypotheses. *Science and life*, 2013, no. 7, pp. 18–30. In Rus.
12. *Geografiya. Sovremennaya illyustrirovannaya entsiklopediya* [Geography. Modern illustrated encyclopedia]. Ed. by A.P. Gorokin. Moscow, Rosman-Press, 2006. 624 p.
13. Pariyskiy N.N. The change in the length of day and deformations of the Earth. *Astronomy reports*, 1945, vol. 22, Iss. 2, pp. 89–96. In Rus.

14. Ambartsumyan V.A. (Nazvanie ne afishiruetsya) [No named published]. *News of the Academy of Sciences of the Armenian Soviet Socialist Republic*, 1958, vol. 11, no. 9, pp. 91–109.
15. Grishankov G.E. *Litosfera: struktura, funktsionirovanie, evolyutsiya* [Lithosphere: structure, functioning, evolution]. Simferopol, Original-M, 2008. 448 p.
16. Milanovsky E.E. Pulsatsionnaya gipoteza geotektoniki, ee stanovlenie i znachenie dlya ponimaniya zakonomernostey Zemli [Pulsation hypothesis of geotectonics, its formation and importance for understanding the laws of the earth]. *Nauchnoe nasledie M.A. Usova i ego razvitie* [Scientific heritage of M.A. Usov and its development]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. pp. 107–141.
17. Milanovsky E.E. Pulsation and expansion of the Earth is a possible key to understanding its tectonic development and volcanism in Phanerozoic. *Nature*, 1978, no. 7, pp. 20–27. In Rus.
18. Belousov V.V. Shantser E.V. Geodinamicheskie protsessy i osnovnye cherty struktury zemnoy kory [Geodynamic processes and the main features of the earth crust structure]. *Bolshaya sovetskaya entsiklopediya* [The Great Soviet encyclopedia]. Moscow, Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1972. Vol. 9. pp. 482–483.
19. Odesskii I.A. Ob odnoy iz prichin prirodnykh katastrof [The causes of natural disasters]. *Ekologiya i razvitie obshchestva. Sbornik materialov XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Ecology and development of society: Proc of the XIII International scientific-practical conference]. St-Peterburg, MAN-EB Publ., 2008. pp. 48–56.
20. Vibert C., Azeb A., Ianos S., Mine E. Unusual Rock Mechanics Challenges Encountered During Construction of a Large Dam. 8<sup>th</sup> *Asian Rock Mechanics Symposium. Rock Mechanics for Global Issues*. Japan, Sapporo, Japanese Committee for Rock Mechanics, October 2014, pp. 2085–2095.
21. Ware K., Westion J.F., Dickinson J.A. Investigation of a Canyon System of Cote D'Ivoire to Determine Present Day Risk of Slope Instability for a Field Development. *SUT Conference Paper*. UK, 2012. pp. 543–550.
22. Sharra L., Bozo L., Allkja S. Unstable rock masses in the highway Durres-Prishtina. *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on*. London, Taylor & Francis Group, 2014. pp. 1171–1174.
23. Zhang Yujie, Wang Yanqiu, Jaiswal Priyank. A Model for Propagation of Tensile Fractures in Heterogeneous Natural Media. *SEG Conference Paper*. USA, New Orleans Annual Meeting, 2015, pp. 5174–5178. Available at: <http://dx.doi.org/10.1190/segam2015-5930036.1> (accessed 25 April 2019).
24. Hamed Berimani, Homayoon Khoshnavan. Caspian Sea Southern Coasts Seismic Vulnerability. *International offshore and Polar Engineering Conference*. USA, Hawaii, 19–24 June, 2011. pp. 660–664.
25. Zuo J.Y., Pan Sh., Wang K. Delineation of Gravitational Instability Induced by Gas Charges into Oil Reservoirs Using Diffusion and Flory-Huggins-Zuo Equations. *SPE Conference Paper*. Australia, Perth, 25–27 October, 2016. pp. 546–559.
26. Chatterjee C., Reyes A. Geomechanics in Unconventional Reservoir: a New Approach to Drilling Integrating Advanced Acoustic Measurements and Formation Evaluation. *SPE Conference Paper*. Australia, Brisbane, 23–25 October, 2018. pp. 42–60.
27. Leunda G., Dias G., Mendoza E., Capello N. Landscape Transformation Associated to the Development of Camisea Project and the Effectiveness of the Off Shore in Land Approach. *SPE Conference Paper*. Argentina, Buenos Aires, 18–19 May, 2017. pp. 58–67.
28. Mullins O.C., Dumont H. The Critical Role of Asphaltene Gradients and Data Integration in Reservoir Fluid Geodynamics Analysis. *SPE Conference Paper*. USA, Texas, San Antonio, 9–11 October, 2017. pp. 543–563.
29. Chen G., Kawakami T., Zhang Y. Mechanism Analysis of Earthquake Induced Extreme Motions: Clarifying Extreme Acceleration. *Proc. of 51<sup>st</sup> Rock Mechanics. Geomechanics Symposium*. California, San Francisco, American Rock Mechanics Association, 25–28 June, 2017. pp. 426–432.
30. Azhari A., Ozbay U. Evaluating the Effect of Earthquakes on Open Pit Mine Slopes. *Proc. of 50<sup>th</sup> Rock Mechanics. Geomechanics Symposium*. Texas, Houston, American Rock Mechanics Association, 26–29 June, 2016. pp. 315–324.
31. Williams-Stroud S.C. Earth Stress and Seismic Hazard from the Size-Frequency Distribution of Seismic Events. *Proc. of 51<sup>st</sup> Rock Mechanics. Geomechanics Symposium*. California, San Francisco, American Rock Mechanics Association, 25–28 June, 2017. pp. 544–550.
32. Williams-Stroud S.C. A geological approach to seismicity b-values: Implications for hazard assessment. *Proc. of SEG International Exposition and 87<sup>th</sup> Annual Meeting*. USA, Texas, Houston, 2017. pp. 5381–5385.

Received: 29 April 2019.

#### Information about the authors

**Konstantin I. Borisov**, Dr. Sc., associate professor, head of department, Siberian Federal University.

**Lev K. Gorshkov**, Honoured Science Worker, Dr. Sc., professor, V.P., International Academy of Sciences of ecology, human and nature safety.

**Alexey P. Sofin**, Cand. Sc., associate professor, International Academy of Sciences of ecology, human and nature safety.

**Lyudmila A. Fedorova**, Cand. Sc., associate professor, International Academy of Sciences of ecology, human and nature safety.

УДК 550.834

## ПРОГНОЗ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА НА ОСНОВЕ ДЕТАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ «ГЕОСЕЙФ»

Кочегуров Александр Иванович<sup>1</sup>,  
kaicc@tpu.ru

Иванченков Виктор Павлович<sup>1</sup>,  
am@am.tpu.ru

Орлов Олег Викторович<sup>1</sup>,  
orloff.oleg@mail.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** Хорошо известно, что основными целями прогнозирования геологического разреза являются: определение вещественного состава осадконакопления, выделение продуктивных толщ и оценки их нефтегазоносности. Эти цели достигаются в том числе на основе детальной обработки и интерпретации сейсморазведочных данных с привязкой их к результатам геофизического исследования скважин. В современных программно-алгоритмических комплексах обработки и интерпретации сейсмической информации для прогноза геологического разреза в качестве диагностических признаков в основном применяются амплитудные и энергетические характеристики отраженных волн. Фазочастотные характеристики для этих целей прогноза практически не используются. Все это приводит к тому, что при решении задач прогноза геологического разреза процент ошибочных решений достаточно велик и выделение ложных аномалий динамических и кинематических параметров отражений встречается достаточно часто.

**Цель:** на основе детальной обработки сейсмических материалов в программно-алгоритмическом комплексе «Геосейф» получить прогноз геологического разреза по новым информативным параметрам, извлекаемым из мгновенных фазовых спектров отраженных сейсмических волн.

**Методы и средства исследования:** цифровая обработка сигналов и пространственно-временных полей, дискретное преобразование Фурье, методы математического моделирования, вычислительный эксперимент.

**Результаты.** Подробно рассмотрен состав программно-алгоритмического комплекса «Геосейф» и перечень решаемых на нем задач. Показано, что общий подход к решению задач на комплексе «Геосейф» связан с формированием выбранного маршрута в соответствии с принятым графом обработки от имеющихся исходных данных к нужным результатам. Приведена структура детальной обработки сейсмических материалов при реализации алгоритмов фазочастотной деконволюции с целью прогноза геологического разреза. В результате применения рассмотренной методики проведен фазовременный анализ территории Двуреченско-Карандашовской зоны и построена карта районирования по выделенным типам геологического разреза. При этом выявленные корреляционные связи значений фазочастотной характеристики с зональными и локальными литологическими и тектоническими неоднородностями разреза интерполируются и экстраполируются в межскважинное пространство.

### Ключевые слова:

Прогноз геологического разреза, фазочастотная деконволюция, фазовременный анализ, детальная обработка, программно-алгоритмический комплекс.

### Введение

Одна из основных особенностей современного этапа нефтегазопроисловых работ в Томской области состоит в необходимости более активного вовлечения в разведочный процесс слабо исследованных территорий. К таковым, в полной мере, относятся правобережная часть реки Оби, заключающая в себе большой объем потенциально нефтегазоносных юрских, а в зонах наиболее глубокого прогибания, возможно, и триасовых осадочных отложений. Полученные к настоящему времени материалы геологоразведочных работ не дают оснований для полной и однозначной оценки перспектив нефтегазоносности этого комплекса. Кроме того, даже в районах промышленного освоения месторождений, и в пределах самих месторождений, исключительно актуальной остается проблема определения пространственной модели природного резервуара, характеризующегося, как правило, контрастной латеральной изменчивостью фальт-

рационно-емкостных свойств. Решение этой проблемы не в последнюю очередь связано с развитием новых, более эффективных методов решения задач прогнозирования геологического разреза [1–4]. Поэтому потребности создания новых, более эффективных методов решения задач прогнозирования геологического разреза (ПГР) с привлечением наиболее информативных параметров регистрируемых сейсмических волн определяют методологический аспект постановки задачи [5–8].

Исходя из решаемых задач при прогнозе, все методы ПГР можно разделить условно на два класса: 1) методы изучения структурных особенностей геологического разреза для более детального расчленения слоистых осадочных толщ; 2) методы определения петрофизических характеристик осадочных толщ, выделение на их основе коллекторских особенностей отложений и оценки их нефтегазоносности.

В настоящее время для детального расчленения слоистых толщ широко применяются методы де-

конволюции [9–12]. Эти методы становятся весьма актуальными при поиске месторождений нефти и газа в тонкослоистых геологических средах. В этих средах волны, отраженные от границ раздела геологических сред, интерферируют между собой и выделить границы их раздела становится практически невозможно. Кроме того, интерференционная картина осложняется наложением нерегулярных помех. Поэтому для отождествления границ в тонкослоистых средах, как правило, применяются алгоритмы сжатия сигналов, которые основаны на методах деконволюции. Однако в традиционных методах деконволюции фазовые спектры не оцениваются, их принимают либо минимально фазовыми, либо нуль-фазовыми [13–20]. В то же время именно в сложный закон поведения фазовых спектров сейсмических волн и заложена информация о местоположении отражающих границ, а следовательно, разрешающая способность алгоритмов деконволюции во многом связана с корректным использованием информации о фазе сигнала. Кроме того, фазовые спектры содержат информацию о характере напластования, акустических свойствах и толщине слоев, а также неоднородности поглощения геологических сред. Таким образом, характерное поведение фазовых спектров может служить эффективными признаками обнаружения углеводородов (УВ). Поэтому разработка, исследование и применение методов фазочастотной деконволюции при ПГР имеет важное значение и является весьма актуальной задачей.

Однако практическое применение фазочастотных характеристик (ФЧХ) отраженных сейсмических волн для прогноза геологического разреза встречает определенные трудности. Это, в частности, связано с недостаточной изученностью фазовых спектров отраженных волн, их взаимосвязи с конфигурацией границ и параметрами геологического разреза, а также особенностями их изменения в области залежей нефти и газа. Кроме того, необходимо совершенствование существующих и создание новых фазочастотных алгоритмов обработки сейсмической информации, а также изучение возможности привлечения наряду с ФЧХ других динамических характеристик отраженных волн для комплексного решения задач ПГР.

#### Детализация волнового поля на основе методов деконволюции

В настоящее время при анализе волновых сейсмических полей, как уже отмечалось выше, широко применяются методы деконволюции. Они позволяют существенно повысить разрешенность сейсмических записей, что в свою очередь дает возможность увидеть мелкие детали (нарушение осей синфазности, прогибы, поднятия и т. п.), не видимые на исходных разрезах. В работе [21] подробно рассмотрены вопросы построения алгоритмов фазочастотной деконволюции сейсмических волн и приведены первые результаты прослеживания волн на моделях и реальных данных. Поэтому, не

повторяя рассуждений рассмотренных ранее, приведем только математические соотношения и пояснения к ним, необходимые для понимания структуры и содержания программно-алгоритмического комплекса «Геосейф». Сразу отметим, что алгоритмы фазочастотной деконволюции могут применяться как для оценки времени прихода целевых волн (алгоритмы фазочастотного прослеживания), так и для детального расчленения слоистых неоднородных осадочных толщ и определения формы геологических объектов (алгоритмы фазовременного анализа).

Для решения первой задачи в [21] предложен алгоритм, в основе которого лежат численные расчеты мгновенных фазовых спектров и построение на их основе функции правдоподобия. При этом вычисления спектров осуществляются путем дискретного преобразования Фурье участка сейсмотрассы в окне анализа, которое перемещается по трассе с шагом, равным шагу дискретизации сейсмической трассы. Сформированная функция правдоподобия позволяет оценить временное положение сейсмических сигналов [21] и имеет следующий вид:

$$L(\tau) = \sum_{k=1}^n W(f_k) \cos(\varphi(f_k) - 2\pi f_k \tau), \quad (1)$$

где  $\varphi(f_k)$  – фазовый спектр в текущем окне;  $W(f_k)$  – частотная весовая функция.

Выбор частотной весовой функции определяет вид алгоритма обработки: равновесная (единичная весовая функция) и неравновесная (весовая функция может задаваться искусственным образом, например, быть треугольной функцией).

В основу решения второй задачи были положены выделенные ранее характерные особенности поведения фазовых спектров в зависимости от изменения акустических, поглощающих и дисперсионных свойств геологических сред [6]. На основе выделенных особенностей фазовых спектров были сформированы диагностические признаки, которые далее использовались в качестве информативных прогнозных параметров фазовременного анализа (ФАН-анализа) сейсмических полей [8].

Как ранее было показано [8], ФАН-анализ является инструментом построения картины волнового поля, на которой удастся выделить даже самые слабые амплитудные отражения. Высокая разрешающая способность ФАН-анализа дает возможность получать изображения, отличные по структуре рисунка и интенсивности колебаний, что позволяет сформировать различные типы разреза на исследуемой площади. Сама процедура анализа достаточно проста [8] и заключается в построении набора функций вида (1) для каждой сейсмической трассы в исследуемой области:

$$L_i(\tau) = \sum_{k=0}^{n-1} W_i(f_k) \cos(\varphi(f_k) - 2\pi f_k \tau), \quad (2)$$

где  $i$  – номер синтезированного фильтра ( $i=1, \dots, l$ );  $l$  – число фильтров, используемых при обработке.

На основе сформированных функций (2) строятся ФАН-образы для всех анализируемых трасс, которые в результате их объединения вдоль профиля образуют ФАН-разрез. В качестве эталонных ФАН-образов принимаются образы на пикетах наблюдения, соответствующих положению скважин. На этом этапе используются данные геофизического исследования скважин (ГИС). Для отнесения полученных типов геологического разреза к тому или иному классу используются процедуры автоматической классификации, в основу которых положены нейросетевые технологии распознавания образов.

Как видно из вышеизложенного, для прогнозирования нефтегазоносности продуктивных комплексов используются методы фазочастотной деконволюции, которые базируются на принципиально новых информационных признаках сейсмического волнового поля, заложенных в фазочастотные характеристики отраженных волн. Это потребовало создания нового программно-алгоритмического комплекса, получившего название «Геосейф».

#### Описание программно-алгоритмического комплекса «Геосейф»

Комплекс «Геосейф» предназначен для детальной обработки и интерпретации сейсмических данных, получаемых при поиске месторождений нефти и газа. Исходными данными для него являются временные разрезы общей глубинной точки (ОГТ), а также данные ГИС.

Перечень задач, решаемых на комплексе:

- 1) предварительный анализ и детализация волновых сейсмических полей;
- 2) построение отражающих границ по результатам фазочастотного прослеживания (ФЧП) волн и узкополосной перестраиваемой фильтрации по направлению с использованием данных ГИС;
- 3) выделение дизъюнктивных нарушений и локальных геологических тел на основе анализа объектно-ориентированных разрезов ФЧП;
- 4) построение разрезов ФАН-Г по результатам фазовременного анализа и картирование распространения выделенных типов по площади;
- 5) комплексная интерпретация полученных результатов.

В состав комплекса входят следующие программы (рис. 1):

- **MainPrg** – программа администрирования процессами вычислений;
- **AdmSIDB** – программа администрирования базой данных;
- **LitoAnalys** – программа для исследования и оценки дисперсионных и поглощающих свойств геологических сред;
- **PhaseAnalys** – программа, реализующая алгоритмы фазочастотного прослеживания волн и фазовременного анализа волнового поля;

- **Track Builder** – программа узкополосной перестраиваемой фильтрации по направлению;
- **Changer** – программа преобразования форматов сейсмических данных;
- **Contour** – программа преобразования внутренних форматов комплекса в форматы системы Golden Software Surfer;
- **NewMedium** – программа для моделирования волновых сейсмических полей отраженных волн и геологических сред с дисперсией и поглощением.



Рис. 1. Состав программного комплекса «Геосейф»

Fig. 1. Composition of the software package «Geoseif»

Приведенные выше программы поддерживают согласованные между собой форматы входных данных и дают возможность менять граф обработки. Для организации обработки сейсмических профилей и объединения информации в комплекс введена и реализована в формате PARADOX база данных, структурная схема которой приведена на рис. 2.

Администрирование базой данных осуществляется с помощью программы AdmSIDB, а доступ к данным возможен непосредственно из других программ. К важным характеристикам использованной структуры базы данных и схемы взаимодействия программных модулей можно отнести следующие:

- возможность сохранения в базе промежуточных результатов обработки;
- автоматическое взаимное увязывание различных полей всех таблиц базы;
- использование перекрестных ссылок, позволяющее максимально снизить дублирование информации.

Общий подход к решению задач на комплексе «Геосейф» связан с формированием выбранного маршрута в соответствии с принятым графом обработки от имеющихся исходных данных к нужным результатам. Возможности построения маршрутов обеспечиваются как средствами меню, так и путем составления последовательности выполняемых программ. Примеры таких маршрутов представлены на рис. 3–5.

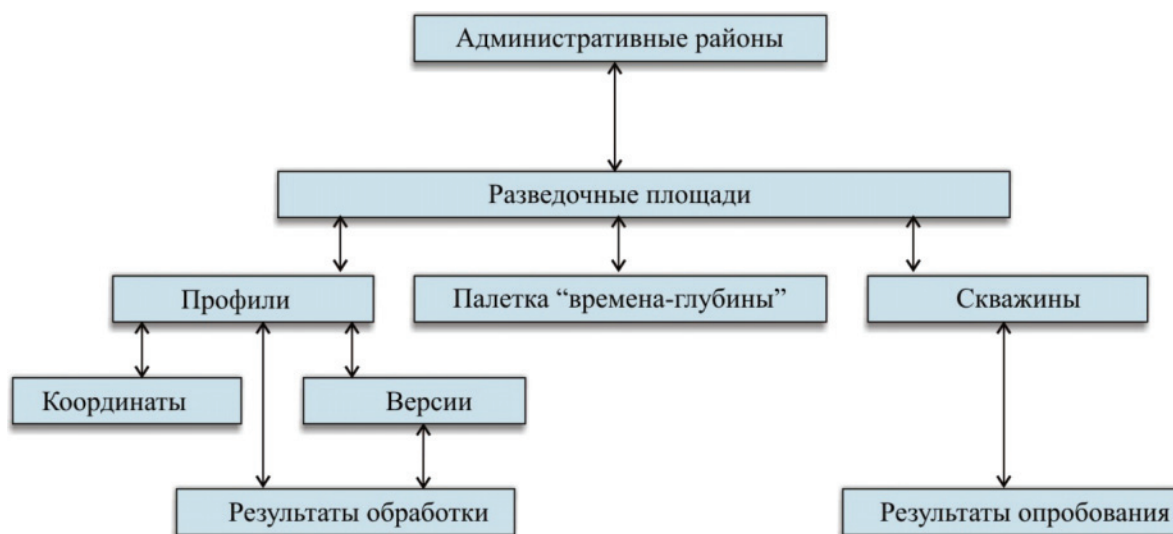


Рис. 2. Структура базы данных комплекса «Геосейф»

Fig. 2. Structure of the database of «Geoseif» complex

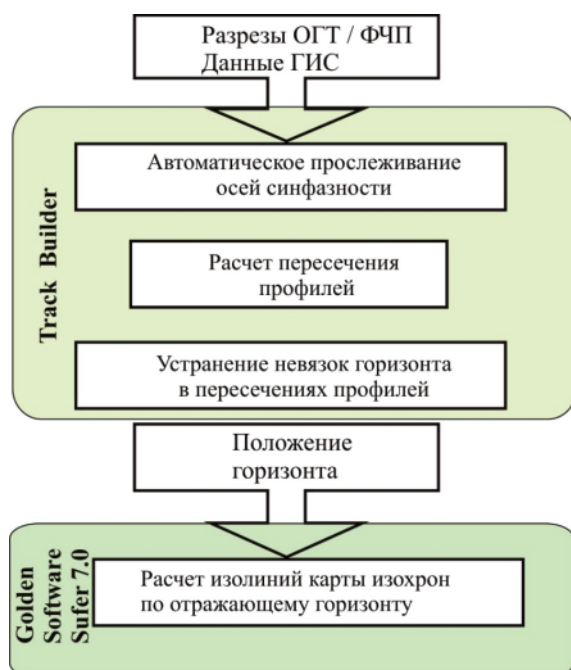


Рис. 3. Общая последовательность построения карт изохрон отражающего горизонта

Fig. 3. General sequence of mapping isochrones of the reflecting horizon

Так, например, задача картопостроения решается на начальном этапе с помощью программы Track Builder, в которой на основании данных ГИС, результатов автоматического прослеживания осей синфазности и увязки горизонта в пересечениях профилей решается задача выделения и отождествления целевого отражающего горизонта. Затем средствами программы Track Builder устраняются систематические и линейные невязки положения горизонта в пересечениях профилей. Конечный этап – построение изолиний, вы-

полняется с использованием дополнительных программных продуктов (в данном случае – Golden Software Surfer 7.0).

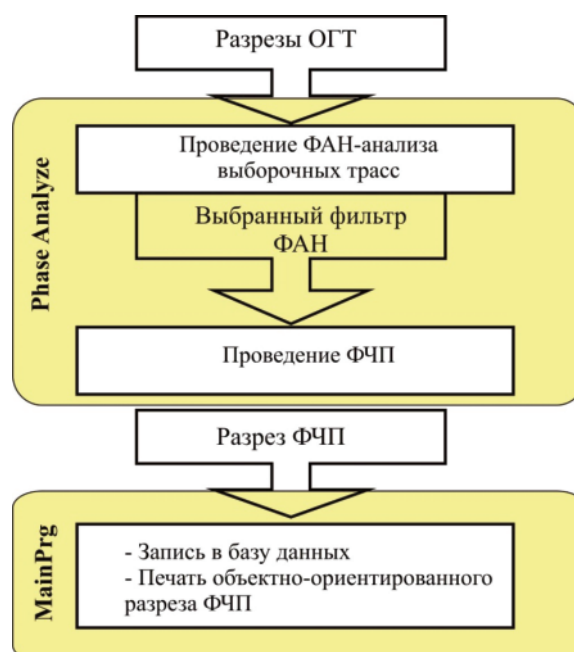


Рис. 4. Последовательность решения задачи прослеживания

Fig. 4. Sequence of solving the tracking problem

При решении задачи прослеживания с неравномерной обработкой на начальном этапе с помощью программы PhaseAnalyz выполняется выборочный ФАН-анализ нескольких суммотрасс во временном интервале исследуемых отложений. По результатам изучения ФАН-образов принимается решение о выборе фильтра ФАН, который будет использоваться в качестве весовой функции при выполнении прослеживания. Затем с помощью той же про-

граммы PhaseAnalys выполняется прослеживание для выбранного временного разреза. Результат прослеживания записывается в базу данных и с помощью программы MainPrg выводится объектно-ориентированный разрез ФЧП.

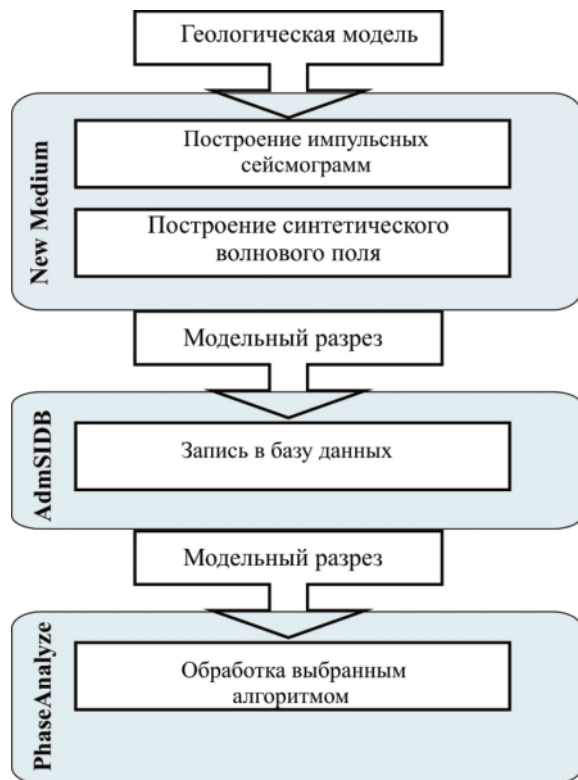


Рис. 5. Исследование эффективности работы алгоритмов на модельных волновых полях

Fig. 5. Investigation of the algorithms performance on model wave fields

При исследовании эффективности разрабатываемых алгоритмов на модельных волновых полях, в соответствии с выбранной геологической моделью, с помощью программы NewMedium строится синтетический временной разрез, который записывается в базу данных с помощью программы AdmSIDB. Затем этот разрез обрабатывается по соответствующему алгоритму с помощью программы PhaseAnalys.

#### Методика детальной обработки временных разрезов ОГТ и ВСП на основе разработанных алгоритмов фазочастотного анализа сейсмических сигналов

На основе установленных свойств ФЧХ отраженных волн и реализованных в комплексе «Геосейф» фазочастотных алгоритмов анализа сейсмических волновых полей в рамках данной работы была предложена методика и реализована технология решения различных задач прогноза нефтегазоносности по результатам обработки временных разрезов ОГТ с привлечением данных ГИС и результатов испытаний скважин.

В основных чертах эта методика включает следующие этапы:

1. Предварительное изучение, анализ структуры и динамических свойств обрабатываемых временных разрезов ОГТ. В результате выполнения этого этапа устанавливается исследуемый временной интервал, соответствующий выделяемому продуктивному горизонту, определяется полоса частот, в которой сосредоточена основная энергия сейсмических сигналов, распределение волн по кажущимся скоростям, изучаются особенности формы выделяемых отражений, определяются их спектры. Данные, полученные на этом этапе, используются далее для выбора параметров процедур фазочастотного анализа.
2. Проводится фазовременной анализ отдельных суммотрасс для временного интервала, соответствующего анализируемой части разреза. Полученные результаты, с одной стороны, используются для выбора параметров фазочастотного прослеживания, а с другой стороны, применяются для последующих построений разрезов ФАН-Г.
3. Методами фазочастотного прослеживания для целевых толщ выполняется построение объектно-ориентированных фазовых разрезов. С использованием результатов ФАН-анализа и материалов вертикального сейсмического профилирования, акустического каротажа и ГИС на построенных разрезах проводится стратиграфическая привязка отражающих горизонтов, изучение структурных особенностей продуктивных пластов, выделение дизъюнктивных нарушений. Для отражений, приуроченных к границам выделяемых объектов, по результатам прослеживания оцениваются их кинематические параметры, которые могут быть использованы в дальнейшем для проведения прогноза, структурных и палеопостроений.
4. В зонах интенсивной интерференции волн отдельные отражения, приуроченные к границам изучаемых толщ, дополнительно прослеживаются методом узкополосной перестраиваемой фильтрации по направлению (кажущейся скорости). При этом осуществляется восстановление формы отдельных отражений для последующей оценки их динамических характеристик. По результатам прослеживания основных отражающих границ при достаточно плотной сети используемых профилей строятся соответствующие карты изохрон или структурные карты по заданным горизонтам.
5. Строятся ФАН-образы для суммотрасс, отнесенных к положению скважин на профилях. Затем полученные образы объединяются в классы в зависимости от типов геологического разреза, выделенных на основании ГИС, результатов бурения и испытания скважин. Это позволяет сформировать набор эталонных ФАН-образов, для которых определяются признаки для последующей автоматической классификации.

6. Строятся разрезы ФАН-Г, составленные из ФАН-образов суммотрасс, выбранных с заданной дискретностью вдоль временного разреза. При сопоставлении полученных ФАН-образов для изучаемых продуктивных отложений с эталонными на разрезах ФАН-Г выделяются однородные зоны, соответствующие определенному типу геологического разреза. На этом этапе для выделения типов разрезов могут также применяться алгоритмы автоматической классификации. Результаты классификации выносятся на карты.
7. Проводится комплексная интерпретация всех материалов обработки с учетом имеющихся данных ГИС, результатов испытания скважин, структурных построений. На этой основе строится прогноз нефтегазоносности продуктивных отложений на исследуемой площади и даются рекомендации на заложение скважин.

Результаты применения данной методики к обработке материалов сейсмических исследований в пределах Двуреченско-Карандашовской зоны обсуждаются в следующем разделе.

#### **Прогноз типов геологического разреза и выделение нефтеперспективных объектов в Двуреченско-Карандашовской зоне**

На программно-алгоритмическом комплексе «Геосейф» была проведена опытная обработка временных разрезов ОГТ по сети выборочных профилей в пределах Двуреченско-Карандашовской зоны. Целевым объектом исследований являлись продуктивные отложения верхней юры, имеющие тонкослоистую структуру. В связи с этим обработка материалов ОГТ была направлена на достижение максимально возможной разрешенности сейсмической записи с сохранением когерентности регистрируемых отражающих горизонтов. В результате детальной обработки исходных временных разрезов ОГТ по программам комплекса «Геосейф» были получены разрезы фазочастотного прослеживания (ФЧП) и разрезы ФАН-Г фазовременного анализа. Построение разрезов осуществлялось для временного интервала 1,900–2,300 с., т. е. для интервала, в котором регистрируются отражения от границ баженовской, георгиевской, васюганской и тюменской свит, несущие информацию о геологическом строении целевого объекта исследований.

Слабая изученность территории исследований бурением (на исследуемых площадях пробурено всего лишь четыре разведочных скважины), близость к Крапивинскому месторождению и ограниченный объем обработанных профилей определили специфику применения предложенной авторами статьи методики прогноза на территории Двуреченско-Карандашовской зоны. Так, особенно сильно проведенной типизации в этих зонах явилось то, что она осуществлялась с опорой на результаты, ранее полученные на соседней, достаточно хорошо изученной бурением Крапивинской площади. Ограниченный объем скважинной информа-

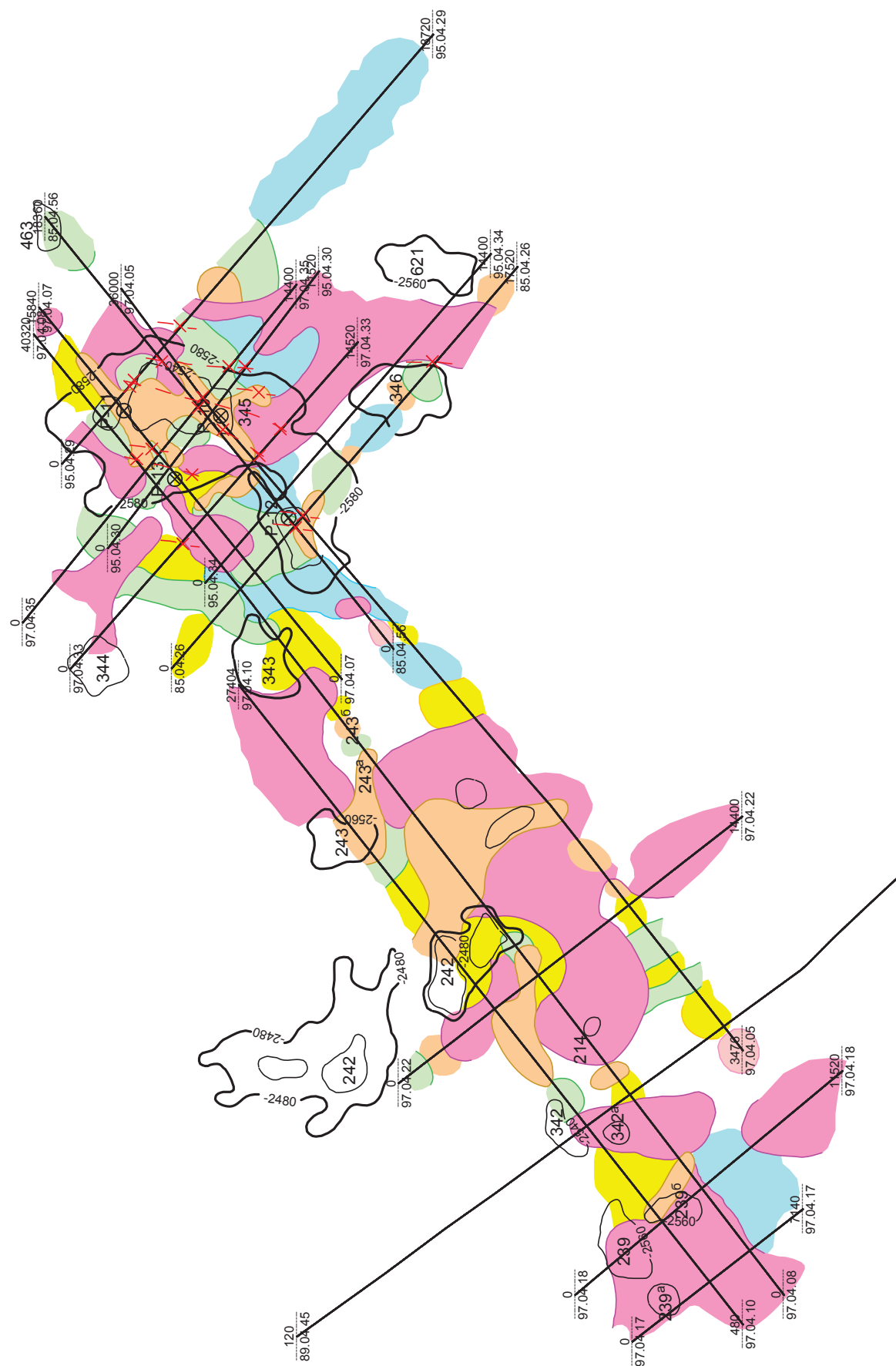
ции, полученной непосредственно на территории исследований, позволил выделить лишь три типа геологического разреза (I, II, и III). При этом ФАН-образы I типа характеризуют зоны с высокоребитным притоком нефти, а ФАН-образы II и III типов – зоны с невысоким притоком нефти. ФАН-образы IV, V и VI типов геологического разреза (неперспективные с позиций наличия углеводородов) определены путем экстраполяции с соседней Крапивинской площадью.

В результате проведенного ФАН-анализа территория Двуреченско-Карандашовской зоны была районирована по выделенным типам геологического разреза следующим образом (рис. 6). Из рассмотрения карты районирования (рис. 6) видно, что в целом для всей зоны характерна пестрота геологического разреза. Наибольшим развитием пользуется III тип разреза. Наиболее перспективный I тип разреза распространен в зоне весьма ограниченно, занимая приблизительно одну пятую часть Двуреченского л.п. Второй, менее перспективный, тип разреза развит главным образом в пределах Двуреченской площади. Участки с этим типом разреза встречаются как внутри Двуреченского л.п., так и в его периферийных частях. Третий тип разреза, характеризующийся как тип с низкими перспективами, распространен исключительно широко, особенно в Карандашовской части рассматриваемой зоны. IV, V и, особенно, VI типы разреза имеют небольшое распространение и часто приурочены к зонам погружения или периферийным частям поднятий, заходя в редких случаях в пределы самих поднятий.

Проведенный анализ разрезов ФАН-Г показал, что типизация геологического разреза продуктивного интервала принципиально возможна в условиях слабой разбуренности территории. Для эталонирования ФАН-образов по типам разреза в этом случае используется информация единичных скважин, пробуренных непосредственно на территории исследований и привлекаются данные скважин по соседним площадям.

#### **Заключение**

Предлагаемая методика прогнозирования типов геологического разреза (с выделением отдельных объектов) основана на изучении фазочастотных характеристик (ФЧХ) отраженных волн, зафиксированных на временных сейсмических разрезах общей глубинной точки. Высокая эффективность геологической интерпретации с применением этой методики достигается за счет детального расчленения разреза тонкослоистой продуктивной толщи, установления связей значений ФЧХ с зональными и локальными литологическими и тектоническими неоднородностями разреза, выявленными по данным бурения. При этом выявленные корреляционные связи, благодаря сохранению общих закономерностей геологического строения, интерполируются и экстраполируются в межскважинное и заскважинное пространство. Для реали-



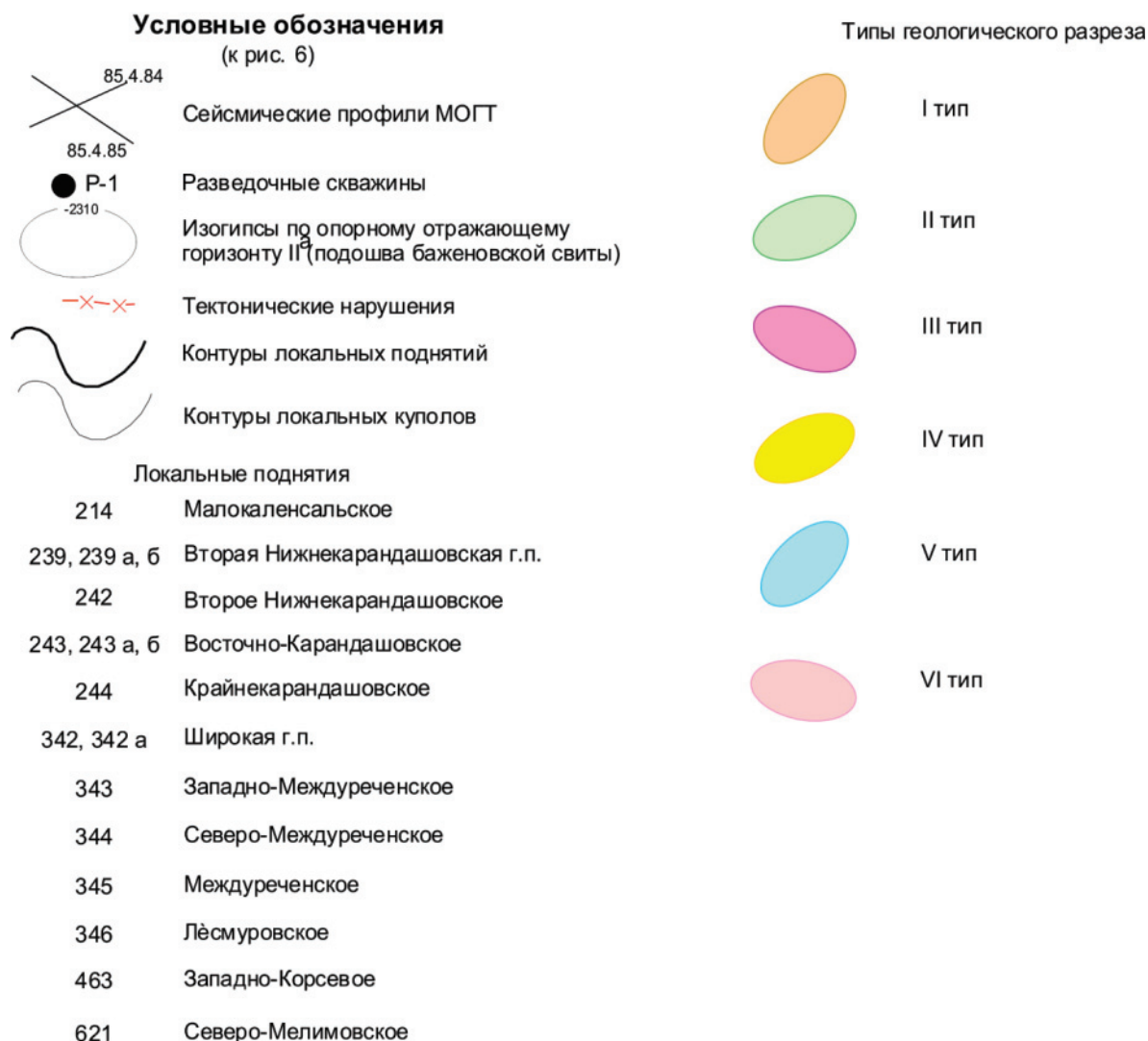


Рис. 6. Карта типов геологического разреза по данным ФАН-Г. Междуреченско-Карандашовская зона

Fig. 6. Map of types of geological section according to FAN-G. Mezhdurechensko-Karandashovskaya zone

зации предложенной методики использован программно-алгоритмический комплекс «Геосейф», позволяющий организовать детальную обработку и интерпретацию сейсмических данных в соответствии с выбранным маршрутом обработки от имеющихся исходных данных к нужным результатам. В результате применения рассмотренной

методики проведен фазовременной анализ территории Двуреченско-Карандашовской зоны и построена карта районирования по выделенным типам геологического разреза.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 18-07-01007).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крылов Д.Н. Детальный прогноз геологического разреза в сейсморазведке. – М.: Недра, 2007. – 195 с.
2. Немова В.Д., Бордюг М.А., Ревяко А.В. Сейсмогеологическое моделирование изменений свойств отложений баженовской свиты в межскважинном пространстве // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 2. – С. 72–97.
3. Самаркин М.А. Теоретическое и модельное обоснование методики определения типов геологического разреза переменной толщины в межскважинном пространстве // Журнал Геофизика. – 2003. – Специальный выпуск. – С. 85–89.
4. Istekova S.A., Umirova G.K. Characteristics of Seismic Data Used To Study the Reservoir of South Torgay Oil and Gas Basin // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2014. – V. 3. – Iss. 11. – P. 17382–17394.
5. Комплексное спектрально-скоростное прогнозирование типов геологического разреза и фильтрационно-емкостных свойств коллекторов / Е.А. Копилевич, И.А. Мушин, Е.А. Давыдова, М.Л. Афанасьев. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2010. – 248 с.
6. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Нгуен Суан Хунг. Прогноз коллекторских свойств пород на основе взаимных фазовых

- спектров отраженных сейсмических волн // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 5. – С. 24–28.
7. Новая методика регионального прогноза высокопродуктивных баженовских коллекторов Западной Сибири / Е.А. Копилевич, М.Б. Скворцов, Н.Д. Сурова, Г.В. Кузнецов // Геология нефти и газа. – 2016. – № 4. – С. 58–63.
  8. Прогноз типов геологического разреза на основе фазовременного анализа данных сейсмических / В.П. Иванченков, А.И. Кочегуров, Нгуен Суан Хунг, О.В. Орлов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 4. – С. 55–66.
  9. Сильвия М.Т., Робинсон Э.А. Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ. – М.: Недра, 1983. – 382 с.
  10. Mohamed Mhmod, Feng Xuan, Xu Cong. Parameters effects on spiking deconvolution of land seismic data // Global Geology. – 2015. – V. 18 (4). – P. 226–231.
  11. Романов В.В. Возможности повышения разрешенности сейсмограмм метода преломленных волн (МПВ) // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 4. – С. 67–73.
  12. Станкевич Л.С. Обработка сейсмических разрезов методом динамического сжатия // Геофизика, геофизическое приборостроение. – 2015. – № 1 (21). – С. 78–85.
  13. Митрофанов Г.М. Гомоморфная фильтрация и слепая деконволюция // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 1. – С. 46–56.
  14. Egbai J.C., Atakpo E., Aigbogun C.O. Predictive deconvolution in seismic data processing in Atala prospect of rivers State, Nigeria // Advances in Applied Science Research. – 2012. – V. 3 (1). – P. 520–529.
  15. Lindberg D.V., More H. Blind Categorical Deconvolution in Two-Level Hidden Markov Models // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2014. – V. 52. – P. 7435–7447.
  16. Idan Ram, Israel Cohen. Multichannel Deconvolution of Seismic Signals Using Statistical MCMC Methods // IEEE Transactions on signal processing. – 2010. – V. 58. – № 5. – P. 2757–2770.
  17. Deconvolution of Seismic Signals in Time and Frequency Domain / Kedarnath Senapati, Aurobinda Routray, Santosh Dhubia, William Kumar Mohanty // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition processing and Pattern Recognition. – 2011. – V. 4. – № 1. – P. 29–47.
  18. Optimal Seismic Deconvolution: Distributed Algorithms / K.N. Plataniotis, S.K. Katsikas, D.G. Lainiotis, A.N. Venetsanopoulos // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1998. – V. 36. – P. 779–792.
  19. Veeken P.C.H., Da Silva M. Seismic inversion methods and some of their constraints // First break. – 2004. – V. 22. – P. 47–70.
  20. Kazemi N., Bongajum E., Sacchi M. Surface-Consistent Sparse Multichannel Blind Deconvolution of Seismic Signals // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2016. – V. 54. – P. 3200–3207.
  21. Фазочастотная деконволюция сейсмических волн / А.И. Кочегуров, Е.А. Кочегурова, И.Э. Ильясова, V. Geringer, K. Reif // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 12. – С. 84–93.

Поступила 09.05.2019 г.

#### Информация об авторах

**Кочегуров А.И.**, кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Иванченков В.П.**, кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Орлов О.В.**, кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.834

## FORECAST OF GEOLOGICAL PROFILE BASED ON DETAILED PROCESSING OF SEISMIC MATERIALS IN THE SOFTWARE-ALGORITHMIC COMPLEX «GEOSEIF»

Alexander I. Kochegurov<sup>1</sup>,

kaicc@tpu.ru

Viktor P. Ivanchenkov<sup>1</sup>,

am@am.tpu.ru

Oleg V. Orlov<sup>1</sup>,

orloff.oleg@mail.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance.** It is well known that the main objectives of forecasting a geological section are to determine the material composition of sedimentation, to select the productive strata and to assess their petroleum potential. These goals are achieved, among other things, on the basis of detailed processing and interpretation of seismic data with reference to the results of well logging. In modern software and algorithmic complexes for processing and interpreting seismic information, the amplitude and energy characteristics of the reflected waves are mainly used as diagnostic signs for prediction of a geological profile. Phase frequency characteristics for this purpose of the forecast are practically not used. All this leads to the fact that when solving the problems of forecasting a geological profile, the percentage of erroneous decisions is quite large and the allocation of false anomalies of dynamic and kinematic parameters of reflections occurs quite often.

**The aim** of the research is to obtain a forecast of the geological section using new informative parameters extracted from the instantaneous phase spectra of the reflected seismic waves on the basis of the detailed processing of seismic materials in the software and algorithmic complex «Geoseif».

**Methods and means of research:** digital signal processing and space-time fields, discrete Fourier transform, mathematical modeling methods, computational experiment.

**Results.** The composition of the software and algorithmic complex «Geoseif» and the list of tasks solved on it are considered in detail. It is shown that the general approach to solving the problems on the «Geoseif» complex is associated with the formation of the selected route in accordance with the accepted processing graph from the available source data to the desired results. The paper presents the structure of the detailed processing of seismic materials during the implementation of phase-frequency deconvolution algorithms for predicting a geological section. As a result of application of the considered methodology, a phase-time analysis of the territory of the Dvurechensko-Karandashovskaya zone was conducted and a zoning map was drawn for the selected types of geological section. At the same time, the identified correlation links between the values of the phase response and the zonal and local lithological and tectonic inhomogeneities of the section are interpolated and extrapolated into the interwell space.

### Key words:

Geological profile forecast, phase-frequency deconvolution, phase-time analysis, detailed processing, software and algorithmic complex.

The work was funded by the Russian Foundation for Basic Research Grants under grant No. 18-07-01007.

### REFERENCES

1. Krylov D.N. *Detalny prognoz geologicheskogo razreza v seysmora-zvedke* [The detailed forecast of a geological section in seismic exploration]. Moscow, Nedra publ., 2007. 195 p.
2. Nemova V.D., Bordyug M.A., Revyako A.V. Seismic-geological modeling for characterization of the Bazhenovka fm. reservoir in the inter-well space. *Technologies of seismic exploration*, 2013, vol. 2, pp. 72–97. In Rus.
3. Samarkin M.A. Teoreticheskoe i modelnoe obosnovanie metodiki opredeleniya tipov geologicheskogo razreza peremennoy tolshchiny v mezhskvazhinnom prostranstve [Theoretical and model reasons for a technique of determination of types of a geological section of variable thickness in interborehole space]. *Zhurnal geofizika*, 2003, Special Issue, pp. 85–89.
4. Istekova S.A., Umirova G.K. Characteristics of Seismic Data Used to Study the Reservoir of South Torgay Oil and Gas Basin. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2014, vol. 3, Iss. 11, pp. 17382–17394.
5. Kopilevich E.A., Mushin I.A., Davydova E.A., Afanasyev M.L. *Kompleksnoe spektralno-skorostnoye prognozirovaniye tipov geologicheskogo razreza i filtratsionno-emkostnykh svoystv kollektorov* [Complex spectral-speed forecasting of types of geological section and reservoir properties of reservoirs]. Izhevsk, Institut komp'yukh issledovaniy Publ., 2010. 248 p.
6. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Nguyen X.H. Prognoz kollektorskiykh svoystv porod na osnove vzaimnykh fazovykh spektrov otrazhennykh seysmicheskikh voln [Prediction of reservoir properties of rocks based on mutual phase spectrums of reflected seismic waves]. *Neftyanoe khozyaystvo*, 2016, no. 5, pp. 24–28.
7. Kopilevich E.A., Skvortsov M.B., Surova N.D., Kuznetsov G.V. Novaya metodika regionalnogo prognoza vysokoproduktivnykh bazhenovskikh kollektorov Zapadnoy Sibiri [New technique of the regional forecast highly productive bazhenovskikh of collectors of Western Siberia]. *Geologiya nefi i gaza*, 2016, no. 4, pp. 58–63.
8. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Nguyen X.H., Orlov O.V. Predicting geological section types based on the phase-temporal analysis of seismic observations data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4, pp. 55–66. In Rus.

9. Silvia M.T., Robinson E.A. *Obratnaya filtratsiya geofizicheskikh bremennykh ryadov pri razvedke na neft i gaz* [The return filtration of geophysical temporary ranks at investigation on oil and gas]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 382 p.
10. Mohamed Mhmod, Feng Xuan, Xu Cong. Parameters effects on spiking deconvolution of land seismic data. *Global Geology*, 2015, vol. 18 (4), pp. 226–231.
11. Romanov V.V. Possibilities of increase in resolution of seismicographic records of a method of the refracted waves (MPV). *Technologies of seismic exploration*, 2013, no. 4, pp. 67–73. In Rus.
12. Stankevich L.S. Obrabotka seismicheskikh razrezov metodom dinamicheskogo szhatiya [Processing seismic cuts by the method of dynamic compression]. *Geofizika, geofizicheskoe priborostroenie*, 2015, no. 1 (21), pp. 78–85.
13. Mitrofanov G.M. Homomorphic filtering and deconvolution. *Technologies of seismic exploration*, 2015, no. 1, pp. 46–56. In Rus.
14. Egbai J.C., Atakpo E., Aigbogun C.O. Predictive deconvolution in seismic data processing in Atala prospect of rivers State, Nigeria. *Advances in Applied Science Research*, 2012, vol. 3 (1), pp. 520–529.
15. Lindberg D.V., More H. Blind Categorical Deconvolution in Two-Level Hidden Markov Models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, vol. 52, pp. 7435–7447.
16. Idan Ram, Israel Cohen. Multichannel Deconvolution of Seismic Signals Using Statistical MCMC Methods. *IEEE Transactions on signal processing*, 2010, vol. 58, no. 5, pp. 2757–2770.
17. Kedarnath Senapati, Aurobinda Routray, Santosh Dhubia, William Kumar Mohanty. Deconvolution of Seismic Signals in Time and Frequency Domain. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition processing and Pattern Recognition*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 29–47.
18. Plataniotis K.N., Katsikas S.K., Lainiotis D.G., Venetsanopoulos A.N. Optimal Seismic Deconvolution: Distributed Algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, vol. 36, pp. 779–792.
19. Veeken P.C.H., Da Silva M. Seismic inversion methods and some of their constraints. *First break*, 2004, vol. 22, pp. 47–70.
20. Kazemi N., Bongajum E., Sacchi M. Surface-Consistent Sparse Multichannel Blind Deconvolution of Seismic Signals. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2016, vol. 54, pp. 3200–3207.
21. Kochegurov A.I., Kochegurova E.A., Ilyasova I.E., Geringer V., Reif K. Phase-Frequency deconvolution of seismic waves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 12, pp. 84–93. In Rus.

Received: 9 May 2019.

#### Information about the authors

**Alexander I. Kochegurov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Viktor P. Ivanchenkov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Oleg V. Orlov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.3/.4.06:551.25:553.2:167–047.58

## ПРОБЛЕМЫ РУДНОЙ ГЕОЛОГИИ И ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ ФАКТОР. ЧАСТЬ 3. МЕТАМОРФИЗМ И МЕЗОТЕРМАЛЬНОЕ РУДООБРАЗОВАНИЕ

Кучеренко Игорь Васильевич,

kivr@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность.** Условия образования известных многочисленных мезотермальных месторождений золота в толщах черных сланцев разного возраста составляют предмет оживленной дискуссии, которая нередко приобретает черты суррогатной и, вероятно, в силу этого бесконечной вследствие исключения конкретным автором или авторским коллективом из учета, анализа, обобщения, обсуждения фактов, важных для решения проблемы, но не вписывающихся в доказательную базу данных разрабатываемых им/ими представлений.

**Цель:** для получения корректных результатов, необходимых для углубления теории гидротермального рудообразования и разработки, совершенствования комплексов эффективных прогнозно-поисковых критериев оруденения, устранять это негативное проявление человеческого фактора и в процедуре реконструкции процессов рудообразования вернуть дискуссию в нормальное русло посредством включения в научный оборот «удобных» и «неудобных» фактов.

**Методы.** Выполнен анализ баз данных, предложенных давно и недавно в обоснование метаморфогенно-гидротермальной и других гипотез образования мезотермальных месторождений золота в толщах черных сланцев. Обсуждаются приведенные авторские материалы, в том числе аналитические данные – результаты полного химического силикатного анализа (мокрого) горных пород, атомно-абсорбционного анализа содержания золота, серебра, ртути в горных породах, петрохимических балансовых расчетов межзональной миграции петрогенных элементов в околорудных метасоматических ореолах, математической обработки содержаний в горных породах рудогенных элементов.

**Результаты.** Сделан вывод о геолого-генетической однородности мезотермальных месторождений золота, образованных в кристаллическом и черносланцевом субстрате. Доказательством этому служат следующие ключевые факты: 1) контроль месторождений глубинными разломами; 2) близкий геологический возраст ранних плутонов, массивов палингенных гранитоидов с многочисленными сопровождающими дайками средне-кислых пород и поздними дайками умеренно-щелочных долеритов, долеритов, лейкодолеритов дорудных, внутрирудных, послерудных генераций, в том числе преобразованными в высокотемпературные биотит-роговообманковые метасоматиты внутрирудными дайками-флюидопроводниками, и руд; 3) аутентичная минералого-петрохимическая зональность околорудных метасоматических ореолов в том и другом субстрате, образованных в условиях калиево-сернисто-углекислотного метасоматизма пропилит-березитового профиля с поступлением в ореолы калия, восстановленной серы, углекислоты, удалением натрия и частично кремния; 4) наследование околорудными метасоматитами петрохимического профиля внутридолеритового метасоматизма и контрастных аномалий фемофильных элементов (P, Mg, Fe, Ti); 5) отвечающие метеоритному стандарту (мантии) изотопные отношения серы сульфидов и углерода карбонатов руд и околорудных метасоматитов. Перечисленные факты исключают участие метаморфизма в рудообразовании. В Ленском районе, как и в других золоторудных районах горно-складчатого обрамления Сибирского кратона, мезотермальные месторождения золота образованы в составе антидромных гранит-диорит-долеритовых флюидно-рудно-магматических комплексов на позднем базитовом этапе их функционирования, а внутрирудные дайки-флюидопроводники преобразованных в высокотемпературные биотит-роговообманковые метасоматиты умеренно щелочных долеритов служат связующим звеном между базитовыми очагами мантии – источниками золотоносных растворов – и месторождениями золота в коре.

**Структура статьи.** В части 3 статьи приведены разделы: содержание проблем и постановка задачи; минералого-петрохимическая зональность околорудных метасоматических ореолов пропилит-березитового профиля в мезотермальных месторождениях золота, образованных в кристаллическом субстрате и толщах черных сланцев; минералого-петрохимическая зональность околорудного метасоматического ореола золоторудного месторождения Сухой Лог. В части 4 статьи приведены разделы: распределение рудогенных элементов в околорудном пространстве мезотермальных месторождений золота, образованных в кристаллическом субстрате и толщах черных сланцев; обсуждение результатов и выводы; заключение; список литературы.

### Ключевые слова:

Мезотермальные месторождения золота, кристаллический субстрат, черные сланцы, магматизм, метаморфизм, рудообразование, человеческий фактор.

### Содержание проблемы и постановка задачи

История возникновения дважды в XX столетии идеи о местных (породных) источниках сосредоточенных в рудах гидротермальных месторождений металлов, составившей в начале века содержание литераль-секреционной гипотезы рудообразования, после забвения в течение нескольких десятилетий возрожденной в шестидесятых–семидесятых годах столетия под названием метаморфогенно-гидротермальной гипотезы, демонстрирует очередную, дополнительный к приведенным ранее [1, 2], пример негативного влияния человеческого

фактора на процесс познания – разработку, совершенствование теории гидротермального рудообразования и следующего из нее комплекса прогнозно-поисковых критериев оруденения.

В том и в другом случае на начальных этапах обоснования гипотез негативное влияние выразилось во вбросе в научный оборот статистически невыверенных «фактов» о приуроченности гидротермальных месторождений к породам с повышенными (высокими) дорудными, приобретенными в разных геологических процессах, в том числе на этапах седиментации и/или зонального регионально-

го метаморфизма, содержаниями рассеянных в породах металлов – породам-донорам, из которых, согласно гипотезам, «излишки» – сверхкларковые массы металлов – переотложены при рудообразовании в руды.

Во втором случае негативное влияние человеческого фактора выразилось также в необоснованной должным образом, сохраняющейся до сих пор в работах многих представителей ученого сообщества квалификации вмещающих руды околорудно измененных пород в называемых метаморфогенно-гидротермальными месторождениях как производных регионального метаморфизма фации зеленых сланцев [3–60]. При этом давно известно, что метаморфические минеральные ассоциации этой фации (хлориты, цоизит, эпидот, альбит, кварц, серицит, карбонаты и др.) образуют также метасоматиты пропилитовой формации, в том числе в обрамлении тыловых зон околорудных метасоматических колонок скарновой, грейзеновой, березитовой, аргиллизитовой формаций [61] и в составе автономной региональной пропилитовой метасоматической формации [62].

В том и другом случае по прошествии непродолжительного времени представление о литолого-геохимическом контроле гидротермальных месторождений было дезавуировано – выяснялось, что промышленные гидротермальные месторождения металлов образованы в блоках земной коры, сложенных породами, включая черные сланцы с повышенными и субкларковыми их содержаниями. Утверждались также одинаково низкие содержания золота в черных сланцах золотоносных и незолотоносных районов [4]. Все это означает, во-первых, признание того, что за повышенные ранее принимались околорудные ореольные значения, во-вторых, уровень дорудных концентраций рассеянного во вмещающих породах металла существенно не влияет на образование его промышленных месторождений – требуется дополнительный внешний источник.

Казалось бы, вместе с опровержением не выдержавшего проверку временем представления о литолого-геохимическом контроле оруденения следовало ожидать отказ от опиравшихся на него гипотез.

Это произошло в первом случае – как эпизод в истории науки осталась литераль-секреционная гипотеза.

Метаморфогенно-гидротермальная гипотеза, сфера приложения которой, в отличие от литераль-секреционной гипотезы, ограничена преимущественно месторождениями золота, урана и вмещающими их толщами черных сланцев, образованными в возрастном диапазоне от позднего архея – раннего протерозоя до современной эпохи, сохраняет популярность в одноэтапном (автономном) и преимущественно в не менее чем двухэтапном (полигенном) вариантах. Последний предполагает «ступенчатое» концентрирование металлов до промышленных их содержаний в ходе независимых геологических процессов [3, 4, 10–12].

Продолжающееся «триумфальное шествие» метаморфогенно-гидротермальной гипотезы со времени ее создания сопровождается расширением перечня геолого-генетических сценариев рудообразования от раннего [3] до современных с вариантами [12–22] – метаморфогенно-гидротермального с концентрированием рассеянного в породах золота метаморфическими или генерированными в гранитных расплавах растворами, гидротермально-осадочного (типа куроко), в том числе с последующими метаморфизмом и/или гранитоидным магматизмом, плутоногенно-гидротермального в генетической связи с магматизмом.

Многообразие и эволюцию представлений об условиях образования одних и тех же золоторудных месторождений можно видеть на примере Байкало-Патомской золоторудной провинции (Ленского золоторудного района) – на родине метаморфогенно-гидротермальной гипотезы, в том числе уникального по запасам золота типового в районе месторождения Сухой Лог и других золоторудных районов.

Один из ранних наиболее популярных сценариев рудообразования в рифейских толщах черных сланцев Ленского района, описавших условия образования открытого в конце шестидесятых годов месторождения Сухой Лог [3], предполагает двухэтапную мобилизацию золота (и, очевидно, сопровождающих металлов) из рассеянного в породах состояния в концентрированное в рудных телах.

Согласно этому сценарию, на раннем этапе в процессе регионального зонального метаморфизма нагревания в обрамлении глубинных разломов под воздействием поступавших глубинных метаморфических (сквозьмагматических) растворов формировались разнофациальные колонки в составе зон, отвечающих:

- амфиболитовой фации (со слюдяными, редко-метальными, керамическими пегматитами);
- эпидот-амфиболитовой фации (с безрудными кварцевыми жилами, иногда с редкометальным, редкоземельным оруденением);
- зеленосланцевой фации, биотит-хлоритовой субфации (со слабо золотоносными кварцевыми жилами и пирит-пирротиновой минерализацией в породах);
- зеленосланцевой фации, хлорит-серицитовой субфации (с основной массой наиболее богатых золотом кварцевых жил, с альбитом и Mg-Fe карбонатами, золото-сульфидной преимущественно пиритовой минерализацией);
- цеолитовой фации (с полиметаллическим оруденением).

Согласно заключению В.А. Буряка, автора приведенного раннего варианта гипотезы, зависимость золотой минерализации от степени метаморфизма пород выражается в миграции – диффузии в застойных поровых растворах золота (и сопровождающих металлов) – из области интенсивного метаморфизма в периферийные зоны более слабого,

сопровождаемой обеднением пород металлами в первой и равномерным обогащением ими пород во второй. Для образования месторождений требуется повторная (на втором этапе) мобилизация металлов из обогащенных ими на первом этапе пород, которая обеспечивается фильтрующимися по разломам, генерированными в очагах гранитной магмы растворами с последующим концентрированием и отложением металлов в локальных структурах.

Более поздние сценарии образования месторождения Сухой Лог включают один [8, 9], два [10] и четыре [11, 12] этапа.

По одноэтапному сценарию рассеянное в породах золото переотложено в руды в процессе тектоно-магматической активизации.

По двухэтапному сценарию прожилково-вкрапленные метасоматические рудные залежи образованы на раннем этапе в процессе палеозойской тектоно-магматической активизации посредством гидротермально-метасоматического преобразования черных сланцев рудовмещающей позднерифейской хомолхинской свиты  $447 \pm 6$  млн л. назад, золотоносные кварцевые жилы – на позднем этапе  $321 \pm 14$  млн л. назад.

Четырехэтапный сценарий образования месторождения Сухой Лог, с незначительными изменениями подтвержденный в [12], предполагает первоначальное накопление металлов в осадках на позднерифейском этапе седиментации, обусловившее геохимическую специализацию вмещающих руды пород. На следующих этапах катагенеза и через 100–150 млн л. на метаморфогенно-метасоматическом происходит перераспределение металлов. Прожилково-вкрапленное оруденение окончательно оформляется на завершающем средне-позднепалеозойском этапе ( $350\text{--}312 \pm 20$  млн л.) в условиях зонального метаморфизма и палинггенно-анатектического гранитообразования.

Все сценарии не подкреплены аналитическими данными, раскрывающими геологическую историю золота и сопровождающих его металлов, как и корректными доказательствами поэтапного концентрирования их в ходе и результате соответствующих геологических процессов. Поэтому сценарии включают версии, достоверность которых неизвестна.

По одному из современных сценариев [13] метаморфогенно-гидротермальное рудообразование в Ленском районе Байкало-Патомской металлогенической провинции началось с формирования в зонах складчато-разрывных дислокаций среди черных сланцев, подвергшихся региональному метаморфизму гидратации фации зеленых сланцев, золотоносной минерализации в составе Mg-Fe карбонатов с насыщением ими пород до 50 об. %. Золоторудные месторождения образованы только в пределах таких структур «буропатизации» в «зоне хлорита» ареала зеленосланцевого метаморфизма. При этом смежные зоны пирротина и биотита региональной метаморфической колонны, а также

зона пренит-пумпеллиитовой фации остаются безрудными. Все перечисленные зоны «близко одно-временны», но с незначительным запаздыванием зон хлорита и пренит-пумпеллиита относительно зон пирротина и биотита. Все это автор сценария А.И. Иванов квалифицирует как свидетельство образования золотоносных зон «буропатизации» при складкообразовании в диапазоне Р-Т-условий, соответствующих «зоне хлорита».

На следующем этапе регионального метаморфизма нагревания (гранито-гнейсового куполообразования) ранее образованные в рудоконтролирующих структурах сидерит и анкерит («буропатизация») замещены кварцем, биотитом и другими минералами с высвобождением и укрупнением тонкодисперсного в карбонатах золота. Золоторудная минерализация образована в послеметаморфических (диафорических) анкерит-кварцевых жилах в низкотемпературных условиях. Синметаморфические (ранние на этом этапе) кианит-кварцевые жилы безрудны.

На завершающем этапе сингранитного (конкудеро-мамаканский комплекс) метаморфизма окончательно формировались золоторудные месторождения (сульфидно-кварцевые жильно-прожилковые системы) в ранее образованных золотоносных структурах рассланцевания и «буропатизации» в Р-Т-условиях «зоны хлорита» в процессах гидротермально-метаморфического рудообразования с участием как метаморфических, так и сингранитных флюидов (как различаются? – И.К.). Предполагается дополнительный привнос золота (аргументы? – И.К.). В условиях интенсивного проявления диафореза (почему не пропилитизации? – И.К.) образованы вмещающие золото-кварц-сульфидные прожилки, анкерит-кварцевые жилы с видимым золотом, существенно мусковитовые и кварц-хлорит-анкерит-мусковитовые метасоматиты.

Согласно другому сценарию, группа месторождений «сухоложского» типа (Сухой Лог, Вернинское, Высочайшее) отнесена к гидротермально (эксгальационно)-осадочным, подвергшимся частичной регенерации в условиях метаморфизма зеленосланцевой фации [14–15]. Залежи слоистых, линзовидно-пластовых, послойно-вкрапленных золото-сульфидных руд отложены в конседиментационных впадинах в обрамлении рудоподводящих (раствороподводящих – И.К.) разломов с последующей регенерацией на коллизионном этапе. Подчеркивается пересечение зонами *первичного* (курсив наш – И.К.) обогащения осадков серой и золотом литологических границ, вследствие чего эти зоны при оконтуривании по бортовому содержанию будут выделены как *секущие* (курсив наш – И.К.) рудные тела [14]. Для месторождений, согласно автору сценария, характерно отсутствие околорудных геохимических (кроме мышьяка), метасоматических ореолов, монометальность (? – И.К.), пиритовый состав руд (? – И.К.). Предполагается поступление золота из магматических, в том числе мантийных, источников. Подобные ме-

сторождения известны в Центрально-Колымском регионе (Хатыннах-Олботское [16]), Енисейском кряже (Олимпиада), Кызыл-Кумах (Амантайтау).

При разных сценариях образования мезотермальных месторождений золота в Урик-Китойской золоторудной зоне Восточного Саяна некоторые объекты (Зун-Холбинское, Барун-Холбинское, Зун-Оспинское, Пионерское месторождения) объединяются в метаморфогенно-гидротермальную генетическую группу [17]. В данном случае природой задолжен, как считает автор сценария, механизм мобилизации золота и сопровождающих его металлов из обладающих повышенными их содержаниями пород офиолитовой ассоциации или образованной на этапе седиментации сульфидной минерализации метаморфогенными растворами. Отложение рудного вещества происходило на геохимических и термодинамических барьерах в зонах тектонических деформаций – сдвига, надвига, осевых частей зон меланжа вследствие снижения температуры и давления в рудообразующих системах.

В Тыйско-Олоkitском метаморфическом поясе Северного Прибайкалья в процессе дислокационного метаморфизма или дислокационно-гидротермального метасоматизма в зонах диафтореза (так у авторов – И.К.) среди биотит-хлоритовых и других сланцев биотит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации ранне- и позднепротерозойских комплексов образованы метаморфогенные кварцевые, кварцево-карбонатные, кварцево-сульфидные жилы, прожилки, линзовидные тела в зонах расслаивания, катаклаза, милонитизации мощностью до 300 м и протяженностью до 15 км [18]. Подчеркивается прямая зависимость золотоносности диафторитов от интенсивности метасоматических преобразований пород в зонах диафтореза (так у авторов – И.К.) – чем интенсивнее проявлен метасоматизм, тем выше золотоносность диафторитов. По мнению авторов сценария, источниками Au, Ag, As, Cu, Pb, Zn, S служили вмещающие породы.

В результате детального изучения вмещающих черных сланцев и руд золотых месторождений Артемовского золоторудного узла Ленского района – составов минералов, текстур и структур руд, кристаллохимии порообразующих и акцессорных минералов, преобразований углеродистого вещества, изотопных составов кислорода кварца, свинца галенита, составов элементов-примесей в минералах пород и руд – выделены минеральные ассоциации: слабо золотоносная (до 2,9 г/т золота в рассеянном в породах пирите – первая сингенетическая и диагенетическая (седиментогенная), еще слабее на порядок золотоносная (в среднем 0,22 и 0,36 г/т золота в рассеянном в породах пирите – вторая катагенетическая и метаморфогенная, поздняя золотоносная (Au в свободной форме и в сростках с сульфидами) в кварцевых и кварц-карбонатных жилах с сульфидами цветных металлов [19]. Вмещающие породы метаморфизованы в условиях серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой

фации при образовании месторождений в диапазоне температур 320–380 °C без участия гидротермальных растворов из внешнего источника. Поскольку внешние источники металлов, в том числе золота, исключены, а процессы диагенеза, катагенеза и метаморфизма до сих пор считаются изохимическими, остается предположить версию автора сценария о накоплении металлов в породах только на этапе седиментации.

Согласно одной из версий метаморфогенного сценария образования золоторудных месторождений Яно-Колымского и Монголо-Охотского орогенных поясов, рудоносность рудоконтролирующих надвиговых структур – одношовных и многошовных надвигов, зон тектонического и автокlastического меланжа (милонитов, бластомилонитов, катаклазитов, тектонобрекчий, раскристаллизованных псевдотахилитов) – определяется геохимической специализацией на золото и сопровождающие его в рудах металлы различных по происхождению и составу петротипов исходных горных пород, преобразованных в результате динамометаморфических (тектоно-метаморфических) процессов в условиях деформаций сжатия [20]. Одновременно с этим подчеркивается – продуктивность каждого типа рудоконтролирующих структур определяется степенью (интенсивностью) динамометаморфических преобразований исходных горных пород.

Метаморфогенно-гидротермальное образование мезотермальных месторождений золота посредством переотложения сверхкларковых масс металла (металлов) из различных «специализированных» на золото пород, в основном черных сланцев разного возраста, или из низкоконцентрированной золотоносной минерализации разного происхождения гидротермальными метаморфогенными или генерированными преимущественно в обводненных гранитных расплавах, или так называемыми «глубинными» растворами, по-прежнему обосновывается, описывается, декларируется без должного обоснования в многочисленных публикациях недавнего и последнего времени [21–60]. Вместе с тем первоначальным сценариям противопоставляются альтернативные – акцент постепенно смещается от сценариев, предполагающих (описывающих) мобилизацию золота с сопровождающими металлами из рассеянного в породах состояния в концентрированное в рудах, к сценариям, описывающим первоначальное (на раннем этапе) накопление золотоносной минерализации посредством механизмов гидротермально-осадочного сингенетического (типа куроко) или гидротермально-метасоматического в разломных структурах эпигенетического минералообразования с последующими преобразованиями в условиях функционирования метаморфогенных и/или магматогенных растворов.

Приведенные материалы демонстрируют многообразие представлений об условиях образования в черносланцевых толщах разных месторождений,

которое сочетается с многообразием представлений об условиях образования одного месторождения, в данном случае Сухого Лога, в течение 50 лет изученного «вдоль и поперек», но для которого предложено разными авторами и авторскими коллективами не менее упомянутых выше четырех версий его образования, исключающих одна другую. В первом случае многообразие может быть объяснено (обусловлено) тем, что природа создала разные месторождения по действительно разным сценариям. Во втором случае многообразия не должно быть – сценарии, кроме одного или все, ложные. Следствие последнего – происхождение (генезис) этого уникального месторождения остается *terra incognita*. Доказательство тому заключено, помимо прочего, в использовании авторами последних сценариев в выводах неконкретных мало о чем говорящих терминов без раскрытия их содержания: эндогенные флюиды, дайковый магматизм, эндогенные источники серы и золота, рудогенерирующий очаг, глубинные источники сосредоточенных в рудах металлов, комплексы малых интрузий и даек пестрого состава и т. д. Очевидная причина использования таких терминов – дефицит (отсутствие) у авторов сценариев конкретной информации, необходимой и достаточной для корректного доказательства и описания содержания рудообразующих процессов, в итоге – для углубления, совершенствования теории гидротермального рудообразования и следующего из нее комплекса эффективных прогнозно-поисковых критериев оруднения.

Приведенные результаты работы предшественников последнего времени и современников демонстрируют одно из негативных проявлений в исследовании данной (и не только) проблемы – человеческого фактора, формирующего препятствия на пути к достижению обозначенной ключевой цели, – игнорирование (исключение из обсуждения) многими участниками эпопеи опубликованных в доступных изданиях фактов, которые не вписываются в доказательную базу разрабатываемых ими представлений. Противоречащие представлениям факты «не замечаются». В течение многих лет изучения обсуждаемой проблемы дискуссия продолжается на параллельных (не пересекающихся) курсах с соблюдением массами редко и несущественно нарушаемого, вероятно, продиктованного уважением чувств коллег принципа – мы не трогаем вас, вы не трогайте нас. Затруднительно признать корректными результаты, полученные в «тепличных» условиях, без содержательного обсуждения «неудобных» фактов в процессе реальной дискуссии – борьбы идей, фактов, аргументов. Пока создается впечатление – исключение из обсуждения «неудобных» фактов есть свидетельство озаченности причастных к решению проблемы авторов публикаций – апологетов геолого-генетических сценариев образования мезотермальных месторождений золота, составляющих основу метаморфогенно-гидротермальной гипотезы, чем угод-

но, но не поиском истины. По этой, в частности, причине дискуссия обещает быть бесконечной. Невозможно представить подобную свободу нравов в области, скажем, медицины, фармакологии, в которых принимаемые на основе исследований решения влияют на жизнь людей, более того, от которых зависит их жизнь.

Включением в научный оборот – обсуждение проблемы метаморфогенно-гидротермального образования мезотермальных месторождений золота накопленных до сего времени достоверных, исключающих неоднозначную интерпретацию, опубликованных давно и недавно, но замалчиваемых («не замечаемых»), очевидно, по причине невозможности объяснить с позиции метаморфогенной гипотезы необъяснимое, фактов достигается возможность решать проблему в комфортных условиях нормальной дискуссии – эффективного условия в недалекой перспективе решить проблему. С этой целью в статье приведены и обсуждаются в том числе «не замечаемые» авторами разных версий метаморфогенной гипотезы факты. К числу последних относятся:

- факты, раскрывающие в сравнительном аспекте минералого-петрохимическую и геохимическую зональность околорудных (рудовмещающих) метасоматических и геохимических ореолов в мезотермальных месторождениях золота, образованных в кристаллическом и черносланцевом субстрате;
- факты, раскрывающие причинно-следственные связи мезотермальных месторождений золота той и другой совокупности с магматизмом;
- факты, дополняющие (подтверждающие) аргументацию следующей из обсуждения перечисленных и других известных фактов генетической концепции рудообразования, альтернативной метаморфогенно-гидротермальной.

**Минералого-петрохимическая зональность околорудных метасоматических ореолов пропилит-березитового профиля в мезотермальных месторождениях золота, образованных в кристаллическом субстрате и толщах черных сланцев**

В исследовании геологических процессов, создающих в толщах черных сланцев мезотермальные месторождения золота, урана, цветных металлов, к числу актуальных генетических проблем относится, в частности, трудно решаемая и до сих пор не решенная проблема реконструкции условий околорудных изменений вмещающих руды пород с образованными в них эпигенетическими, как считается – этапов рудообразования, минеральными ассоциациями в составе, как отмечалось, кварца, серицита, хлоритов, минералов эпидотовой группы, альбита, карбонатов и других минералов в разных видовых и количественных соотношениях. Трудность заключается в том, что эти минеральные ассоциации конвергентны и для корректной диагностики принадлежности их к производным

метаморфизма гидратации фации зеленых сланцев или к магматогенной пропилитовой метасоматической формации требуется выполнение некоторых операций, которыми авторы публикаций, судя по содержанию последних, пренебрегают и принимают решения, исходя из своих предпочтений, но без привлечения дополнительных данных в обоснование принятых решений. Между тем природа оставила указания, которые обеспечивают корректное решение этой ключевой проблемы.

Структура универсальных типовых околоразломных околорудных зональных метасоматических ореолов, вмещающих в мезотермальных месторождениях рудоносные кварцевые жилы и/или залежи жильно-прожилково-вкрапленных руд, представляет собой сочетание периферийных фронтальной, хлоритовой (эпидотовой, эпидот-хлоритовой) минерало-петрохимических зон пропилитовой формации и внутренних альбитовой и тыловой березитовой (лиственитовой) минерало-петрохимических зон березитовой формации (рисунок, табл. 1) [1].

Универсальный статус ореолов-колонок определяется сходными минеральными составами метасоматитов и минерало-петрохимическими изменениями разных исходных пород, мало влияющих на производные метасоматических процессов, в основном на фиксацию примесей в метасоматических минералах, на образование разновидностей последних, на количественные соотношения минеральных видов и разновидностей. В разных по минеральному, химическому составу и происхождению породах, включая толщи черных сланцев, формируется единый порядок минерало-петрохимической зональности с наиболее мощной, в проницаемых породах до многих сотен – первых тысяч метров, фронтальной зоной при последовательно уменьшающихся мощностях промежуточных зон вплоть до наименее мощной тыловой березитовой (лиственитовой) зоны полного преобразования исходных пород мощностью до сантиметров – десятков сантиметров. Напротив, в рудовмещающих массивных (слабо проницаемых) породах, например в гранитах раннепротерозойского кодарского комплекса в Верхне-Сакуканском месторождении золота Северного Забайкалья, мощность околосланцевого метасоматического ореола с его фронтальной зоной достигает всего 10 м.

В толщах черных сланцев не очень редкое явление – отсутствие тыловой зоны или повторяющееся чередование минерало-петрохимических зон в разных сочетаниях. При отсутствии в разрезе ореолов тыловой и смежной альбитовой зон обычно освещенных березитов, обусловленном сильно восстановительным режимом локальной черносланцевой среды (например, на Западном участке месторождения Сухой Лог), золоторудные кварцевые жилы и залежи жильно-прожилково-вкрапленных руд образованы в хлоритовой зоне рудовмещающей пропилитовой формации. В этом случае возникает желание или предлог квалифициро-

вать околорудные изменения черных сланцев как результат регионального метаморфизма гидратации фации зеленых сланцев. Подобные ситуация и квалификация, вероятно, послужили одним из импульсов к возникновению метаморфогенно-гидротермальной гипотезы рудообразования.

Фронтальная зона типовой рудовмещающей метасоматической колонки, сложенная исходными породами, дифференцирована по объему минеральных новообразований на подзоны слабого (до 10 об. %), умеренного (10...20 об. %), интенсивного (20...30 об. %) изменения с тем, чтобы единообразно использовать наименее измененные породы при отсутствии (недоступности) неизмененных в качестве исходных при петрохимических пересчетах, в частности, для оценки межзональной миграции компонентов. Внутренняя граница зоны совпадает с рубежами полного растворения цветных минералов исходных пород как наиболее подверженных свойственному процессу кислотному выщелачиванию – оливина, пироксенов, обыкновенной роговой обманки, биотита, а также наиболее высокотемпературных этапа метасоматизма актинолита и тремолита в сравнении с полевыми шпатами и нерастворимым в кислотных средах кварцем. Общий объем эпигенетических поименованных ниже минералов в разных сочетаниях в зоне, как и в других зонах, возрастает в направлении к возмущающему объекту – трещинному горячему раствору, следовательно, – к внутренней границе зоны.

В смежной более тыловой хлоритовой (эпидотовой, эпидот-хлоритовой) зоне частично сохраняются реликтовые полевые шпаты, кероген, полностью кварц исходных пород. Ассоциации эпигенетических минералов включают кварц, серицит, магнетит, пирит, рутил, лейкоксен, апатит, кальцит, доломит, альбит, цоизит, клиноцоизит, эпидот, хлориты, золото, серебро в различных видовых и количественных соотношениях. На внутренней границе зоны полностью растворены хлориты и/или минералы эпидотовой группы.

В альбитовой зоне ассоциация новообразованных минералов дополнена анкеритом, сидеритом, апатитом, сульфидами, на ее внутренней границе полностью растворены реликтовые полевые шпаты, альбит, окислен кероген (рисунок).

Тыловая зона сложена в полном объеме эпигенетическими кварцем (в сочетании с реликтовым кварцем исходных пород), серицитом, магнетитом, пиритом (сульфидами), рутилом, лейкоксом, кальцитом, доломитом, анкеритом, сидеритом, брейнеритом, с примесью апатита, золота, серебра. Обычны разные сочетания перечисленных карбонатов.

Типовые черты межзональной миграции петрогенных компонентов при околорудном метасоматизме независимо от составов и происхождения вмещающих оруденение исходных (включая черные сланцы) горных пород (табл. 1) выражаются в удалении преимущественно из тыловых зон фор-



**Рисунок.** Тыловая (березитовая) зона (Т) в контакте с альбитовой зоной (А), хлоритовая зона (Х) рудовмещающего метасоматического ореола Вернинского месторождения. Керн (натуральная величина)

**Figure.** Rear (beresite) zone (Т) in contact with albitic zone (А), chloritic zone (Х) of ore containing metasomatic halo of Verninskoe deposit. Core (natural size)

мирующихся метасоматических колонок кремния (до 50 мас. % от исходного содержания), натрия (до 90 мас. %), поступлении преимущественно в тыловые зоны и фиксации в них калия в сериците (до 600 мас. %), углекислоты в карбонатах (до 7900 мас. % в расчете на  $\text{CO}_2$ ), восстановленной серы в сульфидах (до 42800 мас. %). В ближнем (до 1,5...2,0 км) обрамлении глубинных и оперяющих их разломов из поступающих извне металлоносных растворов в поровые растворы боковых пород вплоть до хлоритовой, в некоторых колонках до фронтальной зон включительно, диффундируют [1] химические элементы фемофильной ассоциации Ca, Mg, Fe, Mn, Ti, P, содержание которых в тыловых зонах увеличивается на первые-многие сотни мас. % сравнительно с содержаниями их в исходных породах. Ca, Mg, Fe, Mn фиксируются в карбонатах, Ti – в рутиле, лейкоксене, P – в апатите.

Упомянутые выше указания природы, доказывающие принадлежность эпигенетических этапов рудообразования, минеральных ассоциаций околорудно гидротермально измененного вмещающего мезотермального оруденения кристаллического и черносланцевого субстрата, в отличие от ареалов регионального метаморфизма гидратации фации зеленых сланцев, к сочетающимся в объеме одной зональной метасоматической колонки не свойственной региональному метаморфизму березитовой метасоматической формации в ее тылу и пропилитовой в обрамлении, заключаются в следующем.

- Межзональная миграция компонентов при околорудном метасоматизме в околоразломном варианте происходит в объеме всей метасоматической колонки.
- Как следует из результатов петрохимических пересчетов (табл. 1), термо-динамические и фи-

зико-химические режимы метасоматического процесса березитового петрохимического профиля обеспечивают подвижность (способность к миграции – диффузии с различной скоростью – в соответствии со свойствами всех, включая фемофильные, согласно теории метасоматической зональности Д.С. Коржинского [1], «инертные при всех условиях») компонентов, кроме глинозема, обладающего ограниченной подвижностью в условиях кислотного процесса.

- Большинство компонентов мигрирует – диффундирует – в пределах хлоритовой, альбитовой, тыловой березитовой минералого-петрохимических зон. Наиболее подвижные калий, сера, углекислота в ряде колонок достигают фронтальной зоны (колонки I, III, IV, VII, VIII, XV, в черных сланцах колонки XVI, XVIII). В некоторых колонках (апочерносланцевой XVIII) фронтальной зоны достигают также фемофильные компоненты.
- В системах околоразломного метасоматизма «трещинный раствор – поровый раствор – горная порода» в условиях встречной диффузии компонентов массы диффундирующих из трещинных растворов в поровые компоненты максимально зафиксированы в составах минералов тыловых зон и последовательно уменьшаются от одной минералого-петрохимической зоны к другой в направлении к фронтальной зоне. Напротив, массы диффундирующих из поровых растворов в трещинные компоненты (Si, Na) увеличиваются в направлении к тыловой зоне, достигая в последней до 50 мас. % (Si) и до 90 мас. % (Na) от их масс в исходных породах.

Приведенные материалы доказывают одновременное с березитами тыловых зон образование сложенных эпигенетическими «зеленосланцевыми»

**Таблица 1.** Коэффициенты распределения (КР) (выноса <1, привноса >1) петрогенных элементов в минерало-петрохимических зонах околорудных метасоматических ореолов гидротермальных золоторудных месторождений юго-восточного складчатого обрамления Сибирского кратона

**Table 1.** Coefficients of distribution (CD) (carry out <1, addition >1) of petrogenic elements in mineral zones of near ore metasomatic haloes of hydrothermal gold deposits in South-East folded frame of Siberian craton

| Минерало-петрохимические зоны и подзоны (число проб)<br>Mineral-Petrochemic zones and subzones (number of samples)                                                                                                                             | Химические элементы/Chemical elements |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     | Δ    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----|-----|-----|------|------------------|-----|-----|------------------|------------------|-----|-----|-----|----------------|-----|------|
|                                                                                                                                                                                                                                                | Si                                    | Al  | K   | Na  | S*   | C <sub>кв.</sub> | Ca  | Mg  | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Ti  | Mn  | P   | H <sup>+</sup> | O   |      |
| Кристаллический (несланцевый) субстрат/Crystal (non-shale) substratum                                                                                                                                                                          |                                       |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| Ирокиндинское месторождение/Irokindinskoe deposit                                                                                                                                                                                              |                                       |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| I. Альмандин-диопсид-двуполевошпатовые парагнейсы (AR, 9 проб)/I. Almandine-diopside-two-feldspathic paragneisses (AR, 9 samples)                                                                                                              |                                       |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| ФУ (23)                                                                                                                                                                                                                                        | 1,1                                   | 1,1 | 1,7 | 1,3 | 3,8  | 0,8              | 0,7 | 1,0 | 1,2              | 0,9              | 1,1 | 1,0 | 1,1 | 1,3            | 1,0 | 8,0  |
| ФИ (14)                                                                                                                                                                                                                                        | 1,1                                   | 1,1 | 1,7 | 1,2 | 2,1  | 0,7              | 0,6 | 1,0 | 1,1              | 1,0              | 1,1 | 0,8 | 1,4 | 2,3            | 1,0 | 11,2 |
| X (11)                                                                                                                                                                                                                                         | 1,0                                   | 1,0 | 2,3 | 1,4 | 1,5  | 1,6              | 0,4 | 1,5 | 1,2              | 0,6              | 1,1 | 0,6 | 0,9 | 3,7            | 1,0 | 13,9 |
| A (10)                                                                                                                                                                                                                                         | 0,9                                   | 1,1 | 3,4 | 1,3 | 8,1  | 2,0              | 0,4 | 0,9 | 1,4              | 0,6              | 1,5 | 0,7 | 0,9 | 3,3            | 1,0 | 17,2 |
| T (26)                                                                                                                                                                                                                                         | 0,9                                   | 1,1 | 4,1 | 0,2 | 14,9 | 2,4              | 0,5 | 1,4 | 1,5              | 0,7              | 1,6 | 0,8 | 1,1 | 3,9            | 1,0 | 20,2 |
| II. Альмандин-двуслюдяные парагнейсы (AR, 14 проб)/II. Almandine-two-mica paragneisses (AR, 14 samples)                                                                                                                                        |                                       |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| ФУ (9)                                                                                                                                                                                                                                         | 0,9                                   | 1,1 | 1,1 | 0,9 | 1,1  | 1,2              | 1,3 | 1,5 | 1,1              | 1,1              | 1,1 | 1,5 | 1,4 | 1,6            | 1,0 | 5,6  |
| ФИ (11)                                                                                                                                                                                                                                        | 1,0                                   | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 0,9  | 1,4              | 0,7 | 1,2 | 1,0              | 1,4              | 1,2 | 1,1 | 0,8 | 2,5            | 1,0 | 4,0  |
| X (7)                                                                                                                                                                                                                                          | 1,0                                   | 1,0 | 1,0 | 0,7 | 2,2  | 4,0              | 0,9 | 1,2 | 1,0              | 1,5              | 1,2 | 1,1 | 0,9 | 2,3            | 1,0 | 5,3  |
| A (6)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,8                                   | 1,0 | 1,4 | 0,5 | 4,1  | 19               | 1,2 | 1,4 | 1,1              | 0,9              | 1,3 | 1,1 | 1,0 | 2,3            | 1,0 | 12,6 |
| T (7)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,9                                   | 1,0 | 1,7 | 0,1 | 37   | 16               | 1,0 | 1,1 | 0,7              | 1,6              | 1,0 | 1,6 | 0,9 | 1,9            | 1,0 | 13,8 |
| III. Кальцифилы (AR, 6 проб)/III. Calciphyres (AR, 6 samples)                                                                                                                                                                                  |                                       |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| ФУ (13)                                                                                                                                                                                                                                        | 1,0                                   | 1,0 | 0,9 | 1,2 | 1,5  | 1,0              | 1,0 | 1,0 | 1,2              | 0,7              | 1,0 | 1,8 | 1,1 | 0,9            | 1,0 | 2,9  |
| ФИ (7)                                                                                                                                                                                                                                         | 1,0                                   | 1,0 | 1,3 | 1,0 | 5,5  | 1,0              | 0,9 | 1,0 | 0,9              | 0,6              | 1,1 | 1,3 | 1,2 | 3,0            | 1,0 | 4,8  |
| X (6)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,7                                   | 0,8 | 1,0 | 0,6 | 3,5  | 1,4              | 1,0 | 0,9 | 0,9              | 0,7              | 1,0 | 0,8 | 1,1 | 1,6            | 1,0 | 9,5  |
| A (8)                                                                                                                                                                                                                                          | 1,0                                   | 1,1 | 1,8 | 1,2 | 4,4  | 1,1              | 0,7 | 1,3 | 1,3              | 0,5              | 1,3 | 1,4 | 1,3 | 2,3            | 1,0 | 13,7 |
| T (18)                                                                                                                                                                                                                                         | 1,0                                   | 1,3 | 3,0 | 0,3 | 22   | 1,0              | 0,5 | 1,8 | 1,8              | 0,5              | 1,8 | 1,8 | 1,9 | 4,1            | 1,0 | 19,8 |
| IV. Граниты мигматитовой выплавки (AR, 7 проб)/IV. Granites of migmatitic melting (AR, 7 samples)                                                                                                                                              |                                       |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| ФУ (5)                                                                                                                                                                                                                                         | 1,0                                   | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 0,2  | 2,5              | 1,1 | 1,2 | 0,9              | 1,3              | 0,8 | 0,5 | 0,8 | 3,1            | 1,0 | 1,2  |
| ФИ (6)                                                                                                                                                                                                                                         | 1,0                                   | 1,0 | 0,9 | 1,1 | 0,3  | 4,9              | 1,7 | 1,5 | 1,1              | 2,1              | 0,9 | 1,5 | 1,1 | 2,1            | 1,0 | 3,1  |
| X (10)                                                                                                                                                                                                                                         | 0,9                                   | 1,1 | 0,6 | 1,6 | 0,1  | 11               | 1,6 | 1,6 | 0,9              | 1,7              | 0,6 | 0,9 | 1,5 | 3,7            | 1,0 | 6,9  |
| A (9)                                                                                                                                                                                                                                          | 1,0                                   | 1,1 | 0,8 | 1,0 | 7,6  | 17               | 1,0 | 1,7 | 1,0              | 1,6              | 1,7 | 1,6 | 3,5 | 5,2            | 1,0 | 4,5  |
| T (8)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,9                                   | 1,1 | 1,2 | 0,1 | 20   | 51               | 2,6 | 3,3 | 1,6              | 3,6              | 3,5 | 1,7 | 7,5 | 11             | 1,1 | 18,8 |
| V. Дайковые фельзитовые умеренно щелочные биотитовые микрогранит-порфиры (PZ <sub>3</sub> , 5 проб)<br>V. Dike felsitic moderately alkaline biotitic microgranite porphyry (PZ <sub>3</sub> , 5 samples)                                       |                                       |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| X (4)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,9                                   | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 0,4  | 2,4              | 2,2 | 2,8 | 2,7              | 1,6              | 3,8 | 3,1 | 2,9 | 1,3            | 1,0 | 12,6 |
| A (6)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,7                                   | 1,1 | 1,7 | 0,5 | 1,2  | 4,0              | 3,4 | 4,3 | 4,3              | 1,8              | 6,0 | 4,3 | 4,1 | 2,9            | 1,0 | 27,0 |
| T (6)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,7                                   | 1,2 | 2,6 | 0,1 | 20,1 | 4,9              | 4,5 | 4,9 | 3,1              | 5,5              | 6,2 | 4,6 | 3,3 | 1,5            | 1,0 | 36,8 |
| Кедровское месторождение/Kedrovskoe deposit                                                                                                                                                                                                    |                                       |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| VI. Габбро муйского комплекса (R <sub>3</sub> , 1 проба)/VI. Gabbro of muisk complex (R <sub>3</sub> , 1 sample)                                                                                                                               |                                       |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| X (4)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,9                                   | 1,0 | 1,5 | 2,4 | 24   | 2,2              | 0,6 | 0,9 | 1,2              | 0,7              | 1,3 | 0,8 | 1,7 | 0,9            | 1,0 | 10,6 |
| A (2)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,9                                   | 1,0 | 1,9 | 1,6 | 83   | 2,7              | 0,5 | 0,6 | 1,2              | 0,8              | 1,9 | 0,9 | 1,4 | 0,4            | 1,0 | 13,2 |
| T (2)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,6                                   | 1,1 | 2,5 | 0,5 | 77   | 5,7              | 1,1 | 1,4 | 1,7              | 1,0              | 1,3 | 1,2 | 1,9 | 0,6            | 1,0 | 22,6 |
| VII. Альмандин-двуслюдяные плагиоклазовые парагнейсы Кедровской очагово-купольной постройки (PZ <sub>3</sub> , 1 проба)<br>VII. Almandine-two-mica plagioclase paragneisses of Kedrovskaya chamber-dome structure (PZ <sub>3</sub> , 1 sample) |                                       |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| ФУ (1)                                                                                                                                                                                                                                         | 1,0                                   | 1,0 | 1,7 | 0,5 | 0,5  | 0,5              | 0,9 | 1,1 | 1,4              | 1,4              | 0,9 | 0,7 | 2,4 | –              | 1,0 | 7,0  |
| X (1)                                                                                                                                                                                                                                          | 1,0                                   | 1,1 | 1,1 | 0,8 | 2,6  | 0,7              | 1,4 | 0,5 | 1,2              | 1,4              | 1,1 | 0,6 | 1,7 | –              | 1,0 | 6,0  |
| T (1)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,5                                   | 0,5 | 1,3 | 0,1 | 22   | 14               | 8,1 | 5,4 | 1,7              | 1,6              | 2,0 | 1,4 | 7,5 | –              | 1,0 | 45,0 |
| VIII. Кварцевые диориты Кедровской очагово-купольной постройки (PZ <sub>3</sub> , 6 проб)<br>VIII. Quartz diorites of Kedrovskaya chamber-dome structure (PZ <sub>3</sub> , 6 samples)                                                         |                                       |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| X (1)                                                                                                                                                                                                                                          | 1,0                                   | 1,0 | 0,8 | 1,0 | 1,5  | 4,8              | 1,0 | 1,1 | 1,2              | 0,7              | 1,0 | 1,1 | 0,9 | 1,5            | 1,0 | 3,0  |
| A (5)                                                                                                                                                                                                                                          | 1,0                                   | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 8,9  | 14               | 1,0 | 0,8 | 1,0              | 0,3              | 0,9 | 0,8 | 0,9 | 1,3            | 1,0 | 6,0  |
| X (16)                                                                                                                                                                                                                                         | 1,0                                   | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 11,1 | 10               | 1,0 | 1,0 | 1,0              | 0,9              | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 1,5            | 1,0 | 4,0  |
| A (6)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,9                                   | 0,9 | 1,2 | 0,9 | 32,7 | 22               | 1,3 | 1,5 | 1,6              | 0,7              | 1,9 | 1,4 | 1,5 | 1,1            | 1,0 | 12,0 |
| T (1)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,5                                   | 0,8 | 1,4 | 0,2 | 428  | 48               | 3,2 | 3,4 | 2,7              | 4,2              | 2,7 | 3,4 | 2,6 | 0,3            | 1,1 | 41,0 |
| IX. Дайковые кварцевые диориты Кедровской очагово-купольной постройки (PZ <sub>3</sub> , 7 проб)<br>IX. Dike quartz diorites of Kedrovskaya chamber-dome structure (PZ <sub>3</sub> , 7 samples)                                               |                                       |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| X (17)                                                                                                                                                                                                                                         | 1,0                                   | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 5,4  | 9,1              | 1,0 | 0,9 | 1,1              | 0,6              | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,3            | 1,0 | 4,1  |
| A (22)                                                                                                                                                                                                                                         | 0,9                                   | 1,0 | 1,2 | 0,8 | 14,0 | 17               | 1,2 | 1,2 | 1,5              | 0,6              | 1,3 | 1,2 | 1,3 | 1,2            | 1,0 | 9,3  |
| T (2)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,7                                   | 0,9 | 1,5 | 0,2 | 117  | 34               | 2,4 | 2,7 | 2,4              | 1,6              | 2,1 | 2,4 | 2,3 | 1,0            | 1,0 | 29,7 |
| Западное месторождение/Zapadnoe deposit                                                                                                                                                                                                        |                                       |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| X. Габбро муйского комплекса (R <sub>3</sub> , 6 проб)/X. Gabbro of muisk complex (R <sub>3</sub> , 6 samples)                                                                                                                                 |                                       |     |     |     |      |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| X (3)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,9                                   | 0,9 | 1,2 | 1,1 | 1,0  | 17               | 1,0 | 0,5 | 1,1              | 0,7              | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1,3            | 1,0 | 8,6  |
| A (1)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,9                                   | 0,9 | 2,6 | 1,3 | 0,7  | 31               | 0,8 | 0,4 | 1,0              | 0,2              | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,9            | 1,0 | 14,0 |
| T (1)                                                                                                                                                                                                                                          | 0,8                                   | 1,0 | 6,7 | 0,1 | 1,7  | 42               | 1,2 | 0,8 | 1,2              | 0,2              | 1,1 | 0,8 | 0,7 | 1,5            | 1,1 | 23,5 |

Продолжение табл. 1

Table 1

| Минералогическо-петрохимические зоны и подзоны (число проб)<br>Mineral-Petrochemic zones and subzones (number of samples)                                                                                                                                                                                                                                            | Химические элементы/Chemical elements |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      | Δ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------------------|-----|-----|------------------|------------------|-----|-----|-----|----------------|-----|------|---|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Si                                    | Al  | K   | Na  | S*  | C <sub>гв.</sub> | Ca  | Mg  | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Ti  | Mn  | P   | H <sup>+</sup> | O   |      |   |
| XI. Дайковые долериты (PZ <sub>3</sub> , 8 проб) /XI. Dike dolerites (PZ <sub>3</sub> , 8 samples)                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| X (9)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,9                                   | 0,9 | 2,2 | 1,0 | 0,8 | 10               | 0,9 | 0,8 | 0,9              | 0,5              | 0,9 | 0,8 | 0,6 | 0,9            | 1,0 | 11,0 |   |
| A (2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,8                                   | 0,9 | 5,4 | 0,5 | 1,3 | 15               | 0,8 | 0,9 | 1,1              | 0,1              | 0,9 | 0,8 | 0,6 | 1,0            | 1,1 | 20,0 |   |
| T (5)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,8                                   | 0,8 | 6,5 | 0,1 | 1,6 | 16               | 0,9 | 1,0 | 1,0              | 0,4              | 0,8 | 0,6 | 0,5 | 1,3            | 1,1 | 21,0 |   |
| Петелинское кварцево-жильное поле/Petelinskoe quartz-vein field                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| XII. Покровные кварцевые порфиры келянской свиты (R <sub>3</sub> , 5 проб)/XII. Cover quartz porphyry of kelyanskaja suite (R <sub>3</sub> , 5 samples)                                                                                                                                                                                                              |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| X (4)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1,0                                   | 1,0 | 0,9 | 1,0 | 2,3 | 3,0              | 0,8 | 0,6 | 0,8              | 1,0              | 0,9 | 1,1 | 0,9 | 0,7            | 1,0 | 3,3  |   |
| A* (6)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1,1                                   | 1,0 | 1,1 | 0,9 | 2,4 | 4,6              | 0,6 | 0,5 | 0,8              | 0,4              | 0,9 | 0,7 | 0,6 | 0,6            | 1,0 | 6,8  |   |
| A** (3)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,8                                   | 1,1 | 2,1 | 0,5 | 3,4 | 17               | 1,7 | 2,6 | 1,8              | 0,8              | 1,3 | 1,7 | 1,6 | 1,7            | 1,0 | 20,3 |   |
| XIII. Покровные базальтовые порфиры келянской свиты (R <sub>3</sub> , 2 пробы)/XIII. Cover basalt porphyrites of kelyanskaja suite (R <sub>3</sub> , 2 samples)                                                                                                                                                                                                      |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| X (4)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,9                                   | 0,9 | 1,6 | 0,9 | 2,2 | 16               | 0,7 | 0,8 | 1,0              | 0,4              | 0,9 | 0,7 | 0,8 | 0,8            | 1,0 | 11,1 |   |
| A (2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,8                                   | 0,8 | 3,3 | 0,6 | 38  | 25               | 0,8 | 0,6 | 1,5              | 0,5              | 1,8 | 1,2 | 4,2 | 1,0            | 1,1 | 23,9 |   |
| T (1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,6                                   | 0,9 | 5,2 | 0,1 | 19  | 29               | 1,4 | 0,8 | 0,9              | 0,6              | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 2,3            | 1,1 | 29,4 |   |
| Богодикинское месторождение/Bogodikanskoje deposit                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| XIV. Дайковые долериты (PZ <sub>3</sub> , 16 проб) /XIV. Dike dolerites (PZ <sub>3</sub> , 16 samples)                                                                                                                                                                                                                                                               |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| X (4)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,9                                   | 0,9 | 1,3 | 0,8 | 0,8 | 29               | 0,8 | 1,1 | 0,9              | 0,6              | 0,8 | 0,9 | 0,7 | 1,3            | 1,0 | 12,5 |   |
| A (1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,8                                   | 0,7 | 2,2 | 0,6 | 0,6 | 51               | 0,8 | 0,9 | 1,1              | 0,3              | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 0,7            | 1,1 | 20,7 |   |
| T (2)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,8                                   | 0,9 | 3,1 | 0,1 | 0,9 | 42               | 0,9 | 1,0 | 1,0              | 0,3              | 0,7 | 0,8 | 0,6 | 1,4            | 1,1 | 19,3 |   |
| Верхне-Сакуканское месторождение/Verkhne-Sakukanskoje deposit                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| XV. Кварцевые диориты и кварцевые монзониты кодарского комплекса (PR <sub>1</sub> , 6 проб)<br>XV. Quartz diorites and quartz monzonites of kodar complex (PR <sub>1</sub> , 6 samples)                                                                                                                                                                              |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| ФУ (5)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1,0                                   | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 1,4 | 6,1              | 0,8 | 1,1 | 1,1              | 1,2              | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 1,4            | 1,0 | 3,7  |   |
| X (1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1,0                                   | 0,9 | 0,8 | 0,8 | 3,2 | 19               | 0,9 | 1,0 | 0,9              | 0,6              | 1,0 | 1,0 | 0,9 | 1,7            | 1,0 | 6,0  |   |
| A (4)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,9                                   | 1,0 | 1,4 | 0,6 | 1,7 | 32               | 1,2 | 1,3 | 0,8              | 0,9              | 1,1 | 1,3 | 1,0 | 1,6            | 1,0 | 9,6  |   |
| T (1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,8                                   | 0,9 | 1,1 | 0,1 | 3,4 | 79               | 2,0 | 5,2 | 1,2              | 0,7              | 0,8 | 2,7 | 0,9 | 2,2            | 1,1 | 26,6 |   |
| Регионально-метаморфизованные углеродистые терригенные сланцевые толщи/Regional metamorphosed carbonaceous terrigenous slates terranes                                                                                                                                                                                                                               |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| Кедровское месторождение/Kedrovskoe deposit                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| XVI. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые песчано-алевро-сланцы кедровской свиты (R <sub>3</sub> , 10 проб), залежь метасоматитов типа «слоеного пирога», мощность 220 м<br>XVI. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz sandstone-aleuro-slates of kedrovskaya suite (R <sub>3</sub> , 10 samples), lode of metasomatites, thickness 220 m |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| ФИ (4)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1,0                                   | 1,1 | 1,3 | 0,8 | –   | 1,9              | 0,9 | 1,5 | 1,4              | 1,5              | 1,1 | 0,9 | 1,2 | 1,3            | 1,0 | 6,2  |   |
| X (51)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,9                                   | 1,0 | 0,9 | 0,7 | 62  | 8,7              | 1,9 | 1,8 | 1,5              | 1,0              | 1,2 | 1,7 | 0,6 | 1,9            | 1,0 | 8,1  |   |
| A (73)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 1,0                                   | 1,0 | 1,1 | 0,8 | 67  | 13               | 1,9 | 1,0 | 1,3              | 0,7              | 1,0 | 1,5 | 0,4 | 1,3            | 1,0 | 6,6  |   |
| T (8)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,9                                   | 1,0 | 1,5 | 0,1 | 128 | 20               | 3,4 | 1,9 | 1,3              | 1,0              | 1,4 | 1,8 | 1,3 | 1,9            | 1,0 | 16,2 |   |
| XVII. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые песчано-алевро-сланцы кедровской свиты (R <sub>3</sub> , 1 проба), ореол в обрамлении золотоносной кварцевой жилы<br>XVII. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz sandstone-aleuro-slates of kedrovskaya suite (R <sub>3</sub> , 1 sample), the halo in the frame of gold-bearing quartz vein   |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| A (1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,8                                   | 1,0 | 3,5 | 0,7 | +   | 20               | 1,3 | 12  | 3,8              | 4,4              | 1,8 | 4,7 | 4,0 | 6,6            | 1,0 | 18,0 |   |
| T (1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,6                                   | 1,1 | 5,5 | 0,1 | +   | 70               | 9,8 | 19  | 5,5              | 2,3              | 1,7 | 4,5 | 7,7 | 15             | 1,0 | 43,0 |   |
| Каралонское месторождение/Karalonskoje deposit                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| XVIII. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые крупнозернистые алевро-сланцы водораздельной свиты (R <sub>3</sub> , 2 пробы)<br>XVIII. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz sandstone-aleuro-slates of vodorazdelnaya suite (R <sub>3</sub> , 2 samples)                                                                                    |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| ФИ (8)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,8                                   | 1,0 | 0,7 | 0,8 | 2,1 | 4,5              | 3,2 | 4,0 | 2,2              | 1,9              | 1,4 | 2,2 | 0,7 | 1,2            | 1,0 | 17,9 |   |
| X* (7)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 0,7                                   | 1,0 | 1,2 | 0,5 | 2,7 | 8,2              | 3,8 | 3,7 | 3,0              | 1,6              | 1,5 | 3,2 | 0,3 | 1,0            | 1,0 | 24,8 |   |
| X** (6)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 0,7                                   | 1,1 | 1,2 | 0,5 | 6,5 | 7,4              | 3,4 | 3,7 | 3,1              | 2,0              | 1,8 | 3,0 | 0,3 | 1,6            | 1,0 | 26,4 |   |
| T (3)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,9                                   | 1,1 | 2,2 | 0,1 | 44  | 3,9              | 1,7 | 2,7 | 2,6              | 1,0              | 1,6 | 1,0 | 0,3 | 1,7            | 1,0 | 20,5 |   |
| Месторождение Чертово Кoryто/Chertovo Koryto deposit                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| XIX. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые крупнозернистые алевро-сланцы михайловской свиты (PR <sub>1</sub> , 3 пробы)<br>XIX. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz big-grain aleuro-slates of mikhajlovskaya suite (PR <sub>1</sub> , 3 samples)                                                                                        |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| У (2)1,0                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1,0                                   | 1,0 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 1,5              | 1,2 | 1,0 | 1,3              | 1,1              | 1,0 | 1,0 | –   | 1,0            | 2,9 |      |   |
| X (8)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,8                                   | 0,7 | 0,7 | 0,3 | 2,2 | 15               | 13  | 2,0 | 1,7              | 1,1              | 6,4 | 6,6 | 9,4 | –              | 1,1 | 29,7 |   |
| T (1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,6                                   | 0,7 | 0,9 | 0,1 | 1,0 | 29               | 20  | 2,7 | 1,3              | 0,1              | 6,7 | 22  | 10  | –              | 1,1 | 43,4 |   |
| XX. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые мелкозернистые песчано-сланцы михайловской свиты (PR <sub>1</sub> , 3 пробы)<br>XX. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz fine-grain sandstone-slates of mikhaylovskaya suite (PR <sub>1</sub> , 3 samples)                                                                                      |                                       |     |     |     |     |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |   |
| У (1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1,0                                   | 1,0 | 0,7 | 1,8 | 2,8 | 1,4              | 1,3 | 1,1 | 1,0              | 0,8              | 1,3 | 2,0 | 0,7 | –              | 1,0 | 3,5  |   |
| У (3)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1,0                                   | 1,1 | 0,8 | 1,1 | 2,3 | 2,0              | 1,8 | 2,2 | 1,3              | 1,7              | 1,2 | 2,5 | 1,0 | –              | 1,0 | 6,5  |   |
| X (6)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,6                                   | 1,0 | 0,8 | 0,3 | 5,3 | 20               | 15  | 4,3 | 2,6              | 1,3              | 9,2 | 19  | 9,9 | –              | 1,0 | 34,9 |   |
| T (1)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0,7                                   | 0,9 | 0,9 | 0,1 | 1,1 | 21               | 14  | 3,6 | 2,1              | 2,8              | 8,9 | 37  | 9,7 | –              | 1,0 | 32,5 |   |

Окончание табл. 1

Table 1

| Минералогическо-петрохимические зоны и подзоны (число проб)<br>Mineral-Petrochemic zones and subzones (number of samples)                                                                                                                                                         | Химические элементы/Chemical elements |     |     |     |    |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     | Δ    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----|-----|-----|----|------------------|-----|-----|------------------|------------------|-----|-----|-----|----------------|-----|------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Si                                    | Al  | K   | Na  | S* | C <sub>кв.</sub> | Ca  | Mg  | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Ti  | Mn  | P   | H <sup>+</sup> | O   |      |
| XXI. Углеродистые мусковит-биотитовые полевошпат-кварцевые разнородные песчано-сланцы михайловской свиты (PR <sub>1</sub> , 3 пробы)<br>XXI. Carbonaceous muscovite-biotitic feldspar-quartz various-grain sandstone-slates of mikhaylovskaja suite (PR <sub>1</sub> , 3 samples) |                                       |     |     |     |    |                  |     |     |                  |                  |     |     |     |                |     |      |
| У (1)                                                                                                                                                                                                                                                                             | 1,0                                   | 1,0 | 1,7 | 0,3 | 12 | 1,1              | 0,6 | 2,1 | 1,6              | 1,9              | 1,3 | 1,0 | 0,5 | –              | 1,0 | 7,9  |
| Х (4)                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,7                                   | 0,9 | 1,0 | 0,2 | 17 | 15               | 6,1 | 5,2 | 3,4              | 1,8              | 9,4 | 7,0 | 5,5 | –              | 1,0 | 31,4 |
| Т (1)                                                                                                                                                                                                                                                                             | 0,5                                   | 0,7 | 0,9 | 0,1 | 67 | 33               | 14  | 7,9 | 3,5              | 5,9              | 5,9 | 47  | 7,4 | –              | 1,0 | 55,6 |

Примечание. I–XXI – исходные породы вне и в подзоне слабого изменения фронтальной зоны. Минеральные зоны и подзоны околорудных метасоматических ореолов: ФУ, ФИ – подзоны умеренного и интенсивного изменения фронтальной зоны; У, Х, А, Т – углеродистая, хлоритовая (эпидотовая, эпидот-хлоритовая), альбитовая и тыловая (березитовая, лиственитовая) зоны, \* – умеренного, \*\* – интенсивного изменения. S\* – сера сульфидная, H<sup>+</sup> – водород воды H<sub>2</sub>O. Δ – удельная масса перемещенного (привнесенного и вынесенного) вещества в отношении к массе вещества исходной породы в стандартном геометрическом объеме 10000 Å<sup>3</sup>. Жирным шрифтом выделены контрастные (КР>1,5) аномалии химических элементов. Петрохимические расчеты выполнены по объемно-атомному методу. Полные химические анализы горных пород выполнены в Центральной лаборатории ПГО «ЗапСибгеология» (г. Новокузнецк) под руководством И.А. Дубровской и в Западно-Сибирском Испытательном Центре (г. Новокузнецк) под руководством Г.Н. Юминой.

Note. I–XXI are the initial rocks outside and in subzone of weak alteration of frontal zone. Mineral zones and subzones of near-ore metasomatic haloes: ФУ, ФИ are the subzones of moderate and intensive alteration of frontal zone; У, Х, А, Т are the carbonaceous, chloritic (epidotic, epidot-chloritic), albitic and rear (beresitic, listvenitic) zones, \* – moderate, \*\* – intensive alteration. S\* is the sulfide sulphur, H<sup>+</sup> is the hydrogen of water H<sub>2</sub>O. Δ is the specific weight of the removed (added and carried out) substance in relation to the weight of the initial rock substance in standard geometric measurement 10000 Å<sup>3</sup>. Contrast (CD>1,5) anomalies of chemical elements are put in bold type. Petrochemical calculation are carried out by volume-atomic method. Complete chemical silicate analysis of rocks are carried out in Central laboratory of the PGA «Zapsibgeologia» (Novokuznetsk) under the leadership of I.A. Dubrovskaya and in Western-Siberian Test Centre under the leadership of G.N. Yuminova.

минеральными ассоциациями метасоматитов в обычно крупнообъемных периферийных минералогическо-петрохимических зонах околорудных ореолов-колонок средне-низкотемпературной березитовой формации не в процессе и результате регионального метаморфизма гидратации фации зеленых сланцев, а в мезотермальных околорудных метасоматических процессах, подобно тому, как это происходит в обрамлении залежей высокотемпературных известковых, магнезиальных скарнов, грейзенов, низкотемпературных аргиллизитов. Эти материалы также демонстрируют всеобъемлющую аутентичность структуры (минералогическо-петрохимической зональности), составов околорудных сочетающих березитовую и пропиловую формации, образованных в кристаллическом и черносланцевом субстрате метасоматических ореолов-колонок, отражающую в том и другом субстрате вещественно-генетическую однородность процессов породо-, рудообразования.

#### Минералогическо-петрохимическая зональность околорудного метасоматического ореола золоторудного месторождения Сухой Лог

Для объективной оценки условий образования в толщах черных сланцев золотого оруденения «сухоложского типа» [14] требуется вернуть в научный оборот «забытые» современниками материалы предшественников, полученные в шестидесятые-семидесятые годы прошлого столетия во времена детальной разведки месторождения Сухой Лог и максимальной доступности его для изучения.

Согласно результатам ранних, до открытия и детальной разведки месторождения, исследований коренной золотоносности в бассейне р. Бодай-

бо Ленского района, выполненных С.Д. Шером [63], черные сланцы – разнородные полимиктовые углеродистые песчаники – в обломочной фракции сложены зернами кварца (до 40...50 об. %), плагиоклазов (до 15...20 об. %), обыкновенной роговой обманки (до 5 об. %) с примесью обломков диабазов, альбитофиров, эпидозитов, кварцитов, сцементированных (цемента до 10...15 об. %) более мелкозернистыми агрегатами хлорита, серицита, эпидота, пирротина. В направлении к оруденению плагиоклазы, хлорит полностью замещены серицитом. В обрамлении золоторудных жил измененные породы осветлены, в них образованы многочисленные кристаллы-ромбоэдры анкерита и более крупные порфиробласты-ромбоэдры сидерита, метакристаллы пирита, оторочки рутила вокруг псевдоморфных выделений кварца. По данным петрохимических пересчетов в процессе околорудных изменений пород в последние поступили калий, восстановленная сера и уголекислота, из пород удалены натрий и частично кремний. С.Д. Шер квалифицировал процесс как лиственитизацию.

По данным И.В. Коновалова [64], околорудный метасоматический ореол в обрамлении золотоносной кварцевой жилы месторождения Сухой Лог включает внешнюю, 1-ю, 2-ю промежуточные и внутреннюю минеральные зоны. Слабо измененные песчаники во внешней зоне сложены кварцем, плагиоклазом (андезином), микроклином, обыкновенной роговой обманкой с примесью эпигенетических минералов этапа околорудного метасоматизма – хлорита, эпидота, альбита, серицита, доломита, сидерита. В составе 1-ой промежуточной зоны участвуют кварц, серицит, доломит, пистомезит, альбит, реликтовые андезин, микроклин,

2-ой промежуточной зоны – кварц, серицит, пистомезит, анкерит, альбит, пирит, реликтовый андезин. Внутренняя зона полиминеральна и сложена агрегатом кварца, серицита, кальцита, анкерита, пирита. В процессе метасоматизма из породы вынесены (в расчете на 100 куб. см) кремнезем (19 г), окись натрия (1,06 г), поступили в породу оксид калия (2,06 г), уголекислота (13,73 г), восстановленная сера.

На дальнейшей периферии обрамляющих рудные залежи зональных метасоматических ореолов месторождения Сухой Лог углеродистые песчано-сланцы, алевро-сланцы позднерифейских догалдынской и хомолхинской свит во внешней (биотитовой) зоне регионального метаморфизма нагревания сложены в составе обломочной фракции кварцем (до 60 об. %), полевыми шпатами с примесью хлоритизированного биотита, эпигенетических эпидота, серицита, мусковита, кальцита, доломита, «углистого» вещества, пирита, акцессорных циркона, сфена, апатита, рутила, магнетита [65–67]. В рудных зонах тонкосланцевые метасоматиты, состоящие из серицита, «углистого» вещества, крупных (до 5 мм) удлиненных порфириобластов и гнездовых скоплений железистого карбоната, гнезд, прожилков пирита и кварца, чередуются с массивными метасоматитами, сложенными кварцем (до 80 об. %), серицитом, альбитом, хлоритом при участии скоплений доломита, железистого карбоната, пирита. Кварцевые прожилки нередко имеют расплывчатые контакты, в них прослеживается продолжение поверхностей сланцеватости по положению чешуек серицита в кварце, что свидетельствует о метасоматическом происхождении прожилков. Метакристаллы и скопления карбонатов содержат реликты сланцев. Внутренняя (тыловая) зона метасоматического ореола включает ассоциацию кварца, серицита, магнезиально-железистых карбонатов, пирита, рутила, лейкоксена, апатита. Рутил в метасоматитах образует концентрические каемки вокруг будиноподобных скоплений кварца, карбонатов, хлорита. Изменение химических составов песчаных обидов свит при околорудном метасоматизме выражается (табл. 2) соответственно в выносе из пород кремнезема (содержание в метасоматите снижается до 46,06 мас. % против 62,23 мас. % в песчанике и до 52,0 мас. % против 80,09 мас. %),

привносе в породы окиси калия (до 3,60 мас. % против 1,50 мас. %), уголекислоты в расчете на CO<sub>2</sub> (до 5,28 мас. % против 4,64 мас. % и до 14,08 мас. % против 0,32 мас. %), окиси магния (до 4,0 мас. % против 2,10 мас. % и до 6,60 мас. % против 1,12 мас. %), закиси восстановленного железа (до 6,47 мас. % против 2,66 мас. % и до 14,08 мас. % против 2,02 мас. %), окиси титана (до 0,94 мас. % против 0,55 мас. % и до 0,36 мас. % против 0,08 мас. %). Поступление в породы фосфора зафиксировано участием в составе золотоносных кварцевых жил голубого и розового апатита [68]. Упомянутые авторы публикаций квалифицируют околорудный калиево-сернисто-уголекислотный метасоматический процесс при образовании месторождения Сухой Лог как березитизацию-листвинитизацию.

Рудовмещающий метасоматический ореол на Западном участке месторождения Сухой Лог в разведанной его части сложен метасоматитами промежуточных хлоритовой и альбитовой минеральных зон сводной зональной метасоматической колонки (табл. 3), включающей также фронтальную и тыловую минеральные зоны, составы которых заимствованы из материалов предшественников по недоступной для изучения в последние годы после разведки центральной части месторождения [63–67], и подробно описанных в [69]. Минеральные составы тыловых – альбитовой и собственно тыловой березитовой – минеральных зон рудовмещающего метасоматического ореола месторождения подчеркиваются также результатами минерало-геохимического изучения рудной технологической пробы [70], минеральный состав которой отвечает составу березита, но с примесью альбита – типоморфного минерала смежной с березитовой альбитовой зоны при отсутствии хлорита – вестника более фронтальной хлоритовой зоны. В технологической пробе, сочетающей в своем составе минеральные ассоциации березитовой и альбитовой минеральных зон, отмечены приведенные выше изменения химического состава смеси метасоматических минералов обеих минеральных зон, вмещающих руды, – пониженное против исходных песчано-сланцев, алевро-сланцев догалдынской и хомолхинской свит содержание кремнезема, но повышенное – магния, железа, уголекислоты, восстановленной серы, углеродистого вещества.

Таблица 2. Химические составы песчано-сланцев и апосланцевых метасоматитов рудовмещающего метасоматического ореола месторождения Сухой Лог [66]

Table 2. Chemical compositions of the sandstones and formed in them metasomatites of ore containing metasomatic aureole of Sukhoy Log deposit [66]

| Минеральные зоны<br>Mineral zones                                         | Содержание, мас. % /Content, wt. % |                                |                  |                   |                 |      |      |       |                                |                  |                               |      |                               |                               | Σ      |
|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------|-------------------|-----------------|------|------|-------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|------|-------------------------------|-------------------------------|--------|
|                                                                           | SiO <sub>2</sub>                   | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | CO <sub>2</sub> | CaO  | MgO  | FeO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MnO  | H <sub>2</sub> O <sup>+</sup> | H <sub>2</sub> O <sup>-</sup> |        |
| Догоалдынская свита, R <sub>3</sub> /Dogaldynskaya suite, R <sub>3</sub>  |                                    |                                |                  |                   |                 |      |      |       |                                |                  |                               |      |                               |                               |        |
| Фронтальная/Frontal                                                       | 62,23                              | 12,35                          | 1,50             | 3,50              | 4,64            | 2,66 | 2,10 | 2,66  | 5,04                           | 0,55             | 0,17                          | 0,12 | 2,12                          | 0,08                          | 99,72  |
| Альбитовая/Albitic                                                        | 46,06                              | 22,50                          | 3,60             | 3,64              | 5,28            | 0,56 | 4,00 | 6,47  | 1,84                           | 0,94             | 0,30                          | 0,06 | 4,78                          | 0,24                          | 100,27 |
| Хомолхинская свита, R <sub>3</sub> /Khomolkhinskaya suite, R <sub>3</sub> |                                    |                                |                  |                   |                 |      |      |       |                                |                  |                               |      |                               |                               |        |
| Фронтальная/Frontal                                                       | 80,09                              | 5,65                           | 1,07             | 0,67              | 0,32            | 1,40 | 1,12 | 2,02  | 3,12                           | 0,08             | 0,58                          | 0,06 | 3,38                          | –                             | 99,56  |
| Альбитовая/Albitic                                                        | 52,00                              | 5,65                           | 1,13             | 0,57              | 14,08           | 0,84 | 6,60 | 14,08 | 2,86                           | 0,36             | 0,27                          | 0,31 | 0,70                          | 0,22                          | 99,67  |

**Таблица 3.** Обобщенная схема минеральной зональности рудовмещающего метасоматического ореола месторождения Сухой Лог  
**Table 3.** Generalized plan of mineral zoning of ore containing metasomatic aureole of the Sukhoy Log deposit

| Минеральные зоны, горные породы, свиты<br>Mineral zones, rocks, suites                                                                                     | Минеральный состав<br>Mineral composition                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Фронтальная [63] Песчаники<br>Frontal Sandstones                                                                                                           | Кварц, серицит, альбит, эпидот, хлорит, пирротин. Исходные: кварц, олигоклаз, <u>роговая обманка</u><br>Quartz, sericite, albite, epidote, chlorite, pyrrhotite. Initial: quartz, oligoclase, <u>amphibole</u>                                    |
| Фронтальная [64] Песчаники<br>Frontal Sandstones                                                                                                           | Кварц, серицит, альбит, доломит, сидерит, эпидот, хлорит. Исходные: кварц, андезин, микроклин, <u>роговая обманка</u><br>Quartz, sericite, albite, dolomite, siderite, epidote, chlorite. Initial: quartz, andesine, microcline, <u>amphibole</u> |
| Фронтальная [66] Песчано-, алевросланцы догальдинской и хомолхинской свит<br>Frontal sandstone-, aleuroshales of the dogaldynskaja, chomolchinskaja suites | Кварц, серицит, кальцит, доломит, эпидот, хлорит Исходные: кварц, полевые шпаты, кероген, мусковит, <u>биотит</u><br>Quartz, sericite, calcite, dolomite, epidote, chlorite Initial: quartz, feldspars, kerogen, muscovite, <u>biotite</u>        |
| Хлоритовая [69] Песчано-, алевросланцы имняхской и хомолхинской свит<br>Chloritic sandstone-, aleuroshales of the imnyachskaya, chomolchinskaya suites     | Кварц, серицит, рутил, лейкоксен, магнетит, пирит ± кальцит + анкерит ± сидерит + альбит + <u>хлорит</u><br>Quartz, sericite, rutile, leucosene, magnetite, pyrite ± calcite + ankerite ± siderite + albite + <u>chlorite</u>                     |
| Альбитовая [69]<br>Albitic                                                                                                                                 | Кварц, серицит, рутил, лейкоксен, магнетит, пирит ± кальцит + анкерит ± сидерит + <u>альбит</u><br>Quartz, sericite, rutile, leucosene, magnetite, pyrite ± calcite + ankerite ± siderite + <u>albite</u>                                         |
| Тыловая [63]<br>Rear                                                                                                                                       | Кварц, серицит, рутил, пирит, анкерит, сидерит<br>Quartz, sericite, rutile, pyrite, ankerite, siderite                                                                                                                                            |
| Тыловая [64]<br>Rear                                                                                                                                       | Кварц, серицит, кальцит, анкерит<br>Quartz, sericite, calcite, ankerite                                                                                                                                                                           |
| Тыловая [66]<br>Rear                                                                                                                                       | Кварц, серицит, рутил, лейкоксен, пирит, Mg-Fe-карбонаты, апатит<br>Quartz, sericite, rutile, leucosene, pyrite, Mg-Fe-carbonates, apatite                                                                                                        |
| Тыловая [67]<br>Rear                                                                                                                                       | Кварц, мусковит, пирит, анкерит, сидерит<br>Quartz, muscovite, pyrite, ankerite, siderite                                                                                                                                                         |

Примечание. Подчеркнуты минералы, исчезающие в более тыловых зонах.

Note. The minerals disappearing in more rear zones are underlined.

Таким образом, в результатах изучения предшественниками околорудных метасоматических преобразований вмещающих залежи прожилково-вкрапленных руд и золоторудные кварцевые жилы черных сланцев в золоторудном месторождении Сухой Лог зафиксированы типовые черты мезотермального метасоматического процесса пропилит-березитового профиля:

- типовая метасоматическая зональность околорудного, рудовмещающего ореола-колонки с полиминеральной малоомощной тыловой березитовой зоной в обрамлении крупнообъемных пропилитовых минералогическо-петрохимических зон;
- типовой минеральный состав метасоматита-березита тыловой зоны – кварц, серицит, Mg-Fe карбонаты, пирит (сульфиды) с примесью рутила, лейкоксена, апатита;

- замена в ходе метасоматического процесса сильным основанием калием более слабого основания натрия, частичное удаление из тыловых зон метасоматического ореола кремнезема с фиксацией его в объеме ореола в трещинах и образованием кварцевых жил и прожилков;
- поступление в образующийся метасоматический ореол из внедрившихся извне металлоносных растворов калия, серы, углекислоты, в ближнем обрамлении глубинных разломов, в данном случае рудоконтролирующего и, очевидно, раствороподводящего Кадали-Сухоложского, фемофильных магния, железа, титана, фосфора и фиксация их преимущественно в тыловых зонах ореола соответственно в составе карбонатов, рутила, лейкоксена, апатита.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучеренко И.В. Проблемы рудной геологии и человеческий фактор. Часть 1. Минералогическо-петрохимическая зональность околорудных метасоматических ореолов в мезотермальных месторождениях золота: теория, эксперимент, природа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 105–118.
2. Кучеренко И.В. Проблемы рудной геологии и человеческий фактор. Часть 2. Магматизм и мезотермальное рудообразование // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 6. – С. 148–170.
3. Буряк В.А., Летников Ф.А. О роли процессов регионального метаморфизма и ультраметаморфизма в развитии золоторудения // Вопросы геологии месторождений золота. – Томск: Изд-во Томского университета, 1970. – С. 19–24.
4. Буряк В.А. Генетическая модель метаморфогенно-гидротермального рудообразования // Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 2. – Новосибирск: Наука, 1983. – С. 139–145.
5. Brand N.W., Bottrell S.H., Miller M.F. Concentration of reduced sulphur in inclusions fluids associated with black shales hosted quartz veins gold deposits: implications for mechanisms of transport and deposition of gold and a possible exploration tool // Applied Geochemistry. – 1989. – V. 4. – Iss. 5. – P. 483–491.
6. Nelson C.E. Comparative geochemistry of jasperoids from Carlin-type gold deposits of the western United States // Journal of Geochemical Exploration. – 1990. – V. 36. – Iss. 1–3. – P. 171–195.

7. Shepherd T.J., Bottrell S.H., Miller M.F. Fluid inclusion volatiles as an exploration guide to black shale-hosted gold deposits, Dorellau gold belt, North Wales, UK // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1991. – V. 42. – Iss. 1. – P. 5–24.
8. Основные факторы онтогенеза месторождений благородных металлов суходолжского типа / В.К. Немеров, А.М. Спиридонов, Э.Р. Развозжаева, Н.Л. Матель, А.Е. Будяк, А.М. Станевич // *Отечественная геология*. – 2005. – № 3. – С. 17–24.
9. Evidence of local sourcing of sulphur and gold in an Archaean sediment-hosted gold deposit / V. Selvaraja, M.L. Fiorentini, H. Jeon, D.D. Savard, C.K. Laflamme, P. Guagliardo, S. Caruso, Thi-Hao Bui // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 89. – P. 909–930.
10. Этапы формирования крупномасштабной благороднометалльной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения / Н.П. Лаверов, И.В. Чернышов, А.В. Чугаев, Э.Д. Баирова, Ю.В. Гольцман, В.В. Дистлер, М.А. Юдовская // *Доклады РАН*. – 2007. – Т. 415. – № 2. – С. 236–241.
11. Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района / И.К. Рундквист, В.А. Бобров, Т.Н. Смирнова, М.Ю. Смирнов, М.Ю. Данилова, А.А. Ащеулов // *Геология рудных месторождений*. – 1992. – Т. 34. – № 6. – С. 3–15.
12. Геодинамические условия формирования золоторудных месторождений Бодайбинского неопротерозойского прогиба / М.И. Кузьмин, В.В. Ярмолук, А.М. Спиридонов, В.К. Немеров, Г.Л. Митрофанов // *Доклады РАН*. – 2006. – Т. 407. – № 6. – С. 793–797.
13. Иванов А.И. Роль метаморфических условий преобразований углеродистых карбонатно-терригенных отложений для формирования золотого оруденения на разных этапах коллизионной эпохи развития Байкало-Патомской металлогенической провинции // *Отечественная геология*. – 2017. – № 4. – С. 3–23.
14. Кряжев С.Г. Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2017. – 52 с.
15. Кряжев С.Г. Изотопно-геохимические и генетические модели золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // *Отечественная геология*. – 2017. – № 1. – С. 28–38.
16. Золотоносные литолого-стратиграфические уровни и условия локализации прожилково-вкрапленных руд в Хакчанском и Верхне-Хатынском-Олботском рудных узлах (Магаданская область) / Ч.Х. Арифуров, С.Г. Кряжев, И.В. Арсентьева, М.А. Имамендинова, Н.В. Цымбалюк // *Отечественная геология*. – 2017. – № 4. – С. 24–43.
17. Дамдинов Б.Б. Типы благороднометалльного оруденения юго-восточной части Восточного Саяна: состав, условия формирования, генезис: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – Улан-Удэ, 2018. – 52 с.
18. Сизых А.И., Юденко М.А. Метаморфизм и метаморфогенное рудообразование Тийско-Олохитского метаморфического пояса Северного Прибайкалья // *Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири* / под ред. А.И. Сизых. – Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2013. – С. 68–78.
19. Паленова Е.Е. Минералогия месторождений золота Копыловское, Кавказ, Красное (Артемовский рудный узел, Бодайбинский район): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – М., 2015. – 22 с.
20. Яловик Г.А. Геолого-структурные и вещественные особенности золоторудных месторождений в шарьяжно-надвиговых структурах Яно-Колымского и Монголо-Охотского орогенных поясов (на примере Бадранского, Кариийского и Пильненского месторождений): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2016. – 22 с.
21. Gold mineralization in Proterozoic black shales: Example from the Haoyaerhudong gold deposit, Northern margin of the North China Craton / Wang Jianping, Liu Jiajun, Peng Runmin, Liu Zhenjiang, Zhao Baisheng, Li Zan, Wang Yufeng, Liu Chonghao // *Ore Geology Reviews*. – 2014. – V. 63. – P. 150–159.
22. Межубовский В.В. Геология и золотоносность Герфед-Николаевской рудной зоны (Енисейский край): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Красноярск, 2017. – 24 с.
23. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
24. Злобин В.А. Геохимические особенности рудовмещающих черносланцевых толщ Енисейского края // *Микроэлементный состав осадочных толщ как показатель условий их формирования*. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1989. – С. 105–142.
25. Синцов А.В., Лобанов М.П., Сизых В.И. Рудоносные углистые сланцы Ленского золотоносного района // *Литология и полезные ископаемые*. – 2003. – № 1. – С. 27–37.
26. Марченко Л.Г., Ярцева Л.А., Хуециу Wang. Черносланцевые толщи как источник золота и платины // *Геология и охрана недр*. – 2005. – № 2. – С. 40–44.
27. Relationships between gold-quartz veins and disseminated PGM-bearing gold-sulfide mineralization in black-shales / V.A. Buryak, V.I. Goncharov, N.A. Goryachev, N.V. Tsymbalyuk, E.G. Abissalov // *Doklady Earth Sciences*. – 2005. – V. 400. – Iss. 1. – P. 1–4.
28. Multiple mineralization events in the Zhaxikang Sb-Pb-Zn-Ag deposit and their relationship with the geodynamic evolution in the North Himalayan Metallogenic Belt, South Tibet / D. Wang, Y. Sheng, R. Mathur, J. Jiang, S. Shang, J. Sheng, M. Yu // *Ore geology Reviews*. – 2019. – V. 105. – P. 201–215.
29. Арифуров Ч.Х. Золотоносность черносланцевых толщ и обстановки формирования рудных тел // *Руды и металлы*. – 2010. – № 1. – С. 10–21.
30. Khanchuk A.I., Plyusnina L.P., Nikitenko E.M. The Noble Metal Distribution in the black shales of the Degdekan Gold deposit in Northeast Russia // *Russian journal of Pacific Geology*. – 2011. – V. 5. – № 2. – P. 89–96.
31. Буряк В.А., Гончаров В.И., Горячев Н.А. Эволюционный ряд крупнообъемных золото-платиноидных месторождений в углеродистых толщах // *Доклады РАН*. – 2002. – Т. 387. – № 4. – С. 512–515.
32. Vasilyeva I.E., Shabanova E.V., Razvozzaeva E.A. Noble metals in the insoluble carbonaceous substance of black shales and ores: Direct atomic emission data // *Geochemistry International*. – 2012. – V. 50. – № 9. – P. 771–776.
33. Abramov B.N. The formation of black shale gold deposits in the southern environs of the Siberian Platform (Kodaro-Udokanskaya and Tallai-Karalonskaya zones) // *Doklady Earth Sciences*. – 2013. – V. 449. – № 2. – P. 371–374.
34. Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sediments, laminated quartz veins, and reefs at Bendigo gold mine, Australia: Insights for ore genesis / H.V. Thomas, R.R. Large, S.W. Bull, V. Maslennikov, R.F. Berry, R. Fraser, S. Fround, R. Moye // *Economic Geology*. – 2011. – V. 106. – Iss. 1. – P. 1–31.
35. Relationship between metamorphism and ore formation at the Sukhoi Log gold deposit hosted in black slates from the data of U-Th-Pb isotopic SHRIMP-dating of accessory minerals / M.A. Yudovskaya, V.V. Distler, N.V. Rodionov, A.V. Mokhov, A.V. Antonov, S.A. Sergeev // *Geology of ore deposits*. – 2011. – V. 53. – Iss. 1. – P. 27–57.
36. Xu L., Lehmann B., Mao J. Seawater contribution to polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in Early Cambrian black shales of South China: evidence from Mo isotope, PGE, TRACE element and REE Geochemistry // *Ore Geology Reviews*. – 2013. – V. 52. – P. 66–84.
37. The importance of black shales in the origin of the Amantaytau orogenic gold deposit in Uzbekistan: evidence from pyrite chemistry and sulphur isotope data / J. Pasava, A. Vymazalova, P. Dobes et al. // *Mineral Deposita research for a High Tech World*. – 2013. – V. 1–4. – P. 1174–1177.

38. P-T-X conditions on the genesis of orogenic Au (As, Bi, Ag) deposit in metasedimentary rocks of the Buracao Area, Arai Group, Brasilia Fold Belt, Brasil / G.L.C. Pires, C. Renac, E.M. Bongioio, R. Neumann, A. Barats // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – V. 105. – P. 163–182.
39. Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits / M.A. Yudovskaya, V.V. Distler, V. Yu. Prokofiev, N.N. Akinfiev // *Geoscience Frontiers*. – 2015. – № 7. – P. 453–481. – DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.010.
40. Synsedimentary to early diagenetic gold in black shale-hosted pyrite nodules at the Golden Mile deposit, Kalgoorlie, Western Australia / J.A. Steadman, R.R. Large, S. Meffre, P.H. Olin, L.V. Danyushevsky, D.D. Gregory, I. Belousov, E. Lounejeva, T.R. Ireland, P. Holden // *Economic Geology*. – 2015. – V. 110. – № 5. – P. 1157–1191.
41. Groves D.L., Santosh M. The giant Jiaodong gold province: the Key to a unified model for orogenic gold deposits? // *Geoscience Frontiers*. – 2016. – № 7. – P. 409–417.
42. Volkov A.V., Murashov K.Y., Sidorov A.A. Geochemical peculiarities of ores from the largest Natalka gold deposit in North-Eastern Russia // *Doklady Earth Sciences*. – 2016. – V. 466. – № 2. – P. 161–164.
43. К методике оценки прогнозных ресурсов рудного золота в углеродистых карбонатно-терригенных отложениях Бодайбинского рудного района / В.Д. Конкин, А.И. Иванов, Е.Е. Котельников, В.Е. Васюков, И.О. Захаров // *Отечественная геология*. – 2017. – № 4. – С. 64–80.
44. Ta Nang gold deposit in the black shales of Central Vietnam / T.T. Anh, T.T. Hoa, P.T. Dung, V.H. Li, N.T. Mai, I.V. Gaskov, A.S. Borisenko, A.E. Izokh // *Russian Geology and Geophysics*. – 2015. – V. 56. – Iss. 10. – P. 1414–1427.
45. Noble metals in black shales of the Sukhoi Log gold deposit (East Siberia): evidence from scintillation arc atomic-emission spectrometry / I.E. Vasil'eva, E.V. Shabanova, E.M. Goryacheva, O.T. Sotskaya, V.A. Labusov, A.A. Dzyuba, O.A. Nekludov // *Russian Geology and Geophysics*. – 2018. – V. 59. – № 8. – P. 997–1009.
46. The gold ore deposit Bakyrchic and views on the formation of the mineral deposits in black shale strata / Z. Umarbekova, R. Seltmann, K. Dyussebaeva, M. Kokkuzova // *Proceedings of the 17<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. – 2017. – V. 17. – Iss. 11. – P. 1111–1118. DOI: 10.5593/sgem2017/11/S04.142. URL: [www.sgem.org](http://www.sgem.org) (дата обращения 20.04.2019).
47. Steadman J.A., Large R.R. Synsedimentary, diagenetic and metamorphic pyrite, pyrrhotite and marcasite at the Homestake BIF-hosted gold deposit, South Dakota, USA: Insights on Au-As ore genesis from textural and La-ICP-MS trace element studies // *Economic Geology*. – 2016. – V. 111. – Iss. 7. – P. 1731–1752.
48. A black shale protolith for gold-tellurium mineralization in the Dalradian Supergroup (Neoproterozoic) of Britain and Ireland / J. Parnell, M. Perez, J. Armstrong, L. Bullock, J. Feldmann, A.J. Boyce // *Applied Earth Science*. – 2017. – V. 126. – № 4. – P. 161–175. URL: <https://doi.org/10.1080/03717453.2017.1404682> (дата обращения 20.04.2019).
49. Tatarinov A.V., Yalovic L.I., Vanin V.A. Spherical microparticles from gold-bearing quartz veins of the Irokinda deposit, Western Transbaikalia // *Geodynamics and Tectonophysics Open Access*. – 2016. – V. 7. – Iss. 4. – P. 651–662.
50. Augustin J., Gaboury D. Multi-stage and multi-sourced fluid and gold in the formation of orogenic gold deposits in the world-class Mana district of Burkina Faso-Revealed by LA-ICP-MS analysis of pyrites and arsenopyrites // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – V. 104. – P. 495–521.
51. Damdinov B.B., Damdinova L.B. Zun-Ospa gold deposit, Eastern Sayan: Geology, ore composition and genesis // *Geology of ore deposits*. – 2018. – V. 60. – Iss. 3. – P. 241–264.
52. Nature and source of the ore-forming fluids associated with orogenic gold deposits in the Dharwar craton / B. Mishra, K.L. Pruseth, P. Nazarika, S.S. Chinnasamy // *Geoscience Frontiers*. – 2018. – V. 9. – Iss. 3. – P. 715–726.
53. Formation of epizonal gold mineralization within the Latimojong metamorphic complex, Sulawesi, Indonesia: Evidence from mineralogy, fluid inclusions and Raman spectroscopy / A.Y.A. Hakim, F. Melcher, W. Prochaska, R. Bakker, G. Rantitsch // *Ore Geology reviews*. – 2018. – V. 97. – P. 88–108.
54. Kondrat'eva L.A., Anisimova G.S., Zaitsev A.I. The Zaderzhninskoe gold deposit: mineral composition, fluid inclusions and age (South Verkhoyansk region) // *Russian Geology and Geophysics*. – 2018. – V. 59. – Iss. 10. – P. 1288–1300.
55. Gamyagin G.N., Fridovsky V.Y., Vikent'eva O.V. Noble metal mineralization of the Adycha-Taryn metallogenic zone: Geochemistry of stable isotopes, fluid regime and ore formation conditions // *Russian Geology and Geophysics*. – 2018. – V. 59. – Iss. 10. – P. 1271–1287.
56. Local and regional mass transfer during trusting, veining and boudinage in the genesis of the giant shale-hosted Paracatu gold deposit, Minas Gerais, Brazil / N.H.S. Oliver, B. Thomson, F.H. Freitas-Silva, R.J. Holcombe, B. Rusk, B.S. Almeida, K. Faure, G.R. Davidson, E.L. Esper, P.J. Guimaraes, M.A. Dardenne // *Economic Geology*. – 2015. – V. 110. – Iss. 7. – P. 1803–1834.
57. Chemical evolution of pyrite at the Kopylovsky and Kavkaz black shale-hosted gold deposits, Bodaybo district, Russia: Evidence from EPMA and La-ICP-MS data / E.E. Palenova, E.V. Belogub, O.Y. Plotinskaya, K.A. Novoselov, V.V. Maslennikov, V.A. Kotlyarov, I.A. Blinov, A.A. Kuzmenko, I.G. Griboedova // *Geology of ore deposits*. – 2015. – V. 57. – Iss. 1. – P. 64–84.
58. Gold concentrations in metamorphic fluids: a LA-ICP-MS study of fluid inclusions from the Alpine orogenic belt / K. Rauchenstein-Martinek, T. Wagner, M. Walle, C.A. Heinrich // *Chemical Geology*. – 2014. – V. 385. – P. 70–83.
59. Age, origin and significance of nodular sulfides in 2680 Ma carbonaceous black shale of the Eastern Goldfields Superterrane, Yilgarn Craton, Western Australia / J.A. Steadman, R.R. Large, S. Meffre, S.W. Bull // *Precambrian Research*. – 2013. – V. 230. – P. 227–247.
60. Large R.R., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for carlin-type and orogenic gold deposits // *Economic Geology*. – 2011. – V. 106. – Iss. 3. P. 331–358.
61. Жариков В.А. Некоторые закономерности метасоматических процессов // *Метасоматические изменения боковых пород и их роль в рудообразовании*. – М.: Недра, 1966. – С. 47–63.
62. Плющев Е.В. Гидротермально-метасоматическое минералообразование как региональное геологическое явление и его металлогеническое значение // *Геохимические методы при поисках скрытого оруденения*. – М.: Наука, 1984. – С. 11–20.
63. Шер С.Д. Околорудные изменения, сопутствующие золото-кварцевым жилам в Ленском золотоносном районе // *Метасоматические изменения боковых пород и их роль в рудообразовании*. – М.: Недра, 1966. – С. 282–291.
64. Коновалов И.В. Околорудная зональность одного золоторудного месторождения (Ленский район) // *Геология и геофизика*. – 1973. – № 1. – С. 123–125.
65. Шмотов А.П. Тектонические деформации и сопряженные с ними гидротермально-метасоматические преобразования вмещающих пород (Ленский золотоносный район) // *Доклады АН СССР*. – 1974. – Т. 218. – № 1. – С. 178–181.
66. Шаров В.Н., Шмотов А.П., Коновалов И.В. Метасоматическая зональность и связь с ней оруденения. – Новосибирск: Наука, 1978. – 103 с.
67. Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С.Г. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе // *Геология рудных месторождений*. – 2008. – Т. 50. – № 1. – С. 3–46.

68. Намолов Е.А., Чиркова В.М. Типоморфные ассоциации и региональная минеральная зональность золото-кварцевых жил Бодайбинского рудного района // Геология и полезные ископаемые Восточной Сибири: Тезисы докладов регион. научной конф. – Иркутск: Иркутский гос. ун-т, 1986. – С. 62–63.
69. Петролого-геохимические черты околорудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч. 2. Петрология околорудного метасоматизма / И.В. Кучеренко, Р.Ю. Гаврилов, В.Г. Мартыненко, А.В. Верхозин // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 28–37.
70. Гаврилов А.М., Кряжев С.Г. Минералого-геохимические особенности руд месторождения Сухой Лог // Разведка и охрана недр. – 2008. – № 8. – С. 3–16.

*Поступила 24.04.2019 г.*

#### **Информация об авторах**

**Кучеренко И.В.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDC 553.3/4.06:551.25:553.2:167–047.58

## ORE GEOLOGY PROBLEMS AND THE HUMAN FACTOR. PART 3. METAMORPHISM AND MESOTHERMAL OREFORMATION

Igor V. Kucherenko,

kivr@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance of the research.** The conditions of the known large mesothermal gold deposits formation into black shales states of different age form the subject of animated discussion which often acquires the signs of substitute and probably therefore the endless one as a result of exception by concrete author or author's group of the facts important for the problem solution but which do not fit in database of developing by him/them ideas, from the consideration, discussion, generalization.

**The main aim of the research.** To obtain the correct results required for deepening the hydrothermal ore formation theory and developing, improving the effective forecast-search criteria of the deposits it is necessary to remove this negative manifestation of the human factor and return the discussion in normal course by means of including in scientific expression the «handy» and «non handy» facts in reconstruction of ore formation.

**The methods of the research.** The author has analyzed the database proposed long ago and recently for substantiation of the metamorphic-hydrothermal and others hypotheses of mesothermal gold deposits formation into black shales strates. The paper introduces the author's materials, including the analytic data – the results of the full chemical silicate analysis (wet) of rocks, atomic-absorption analysis of the content of gold, silver, mercury into rocks, petrochemic balance calculations of the between-zoning migration of chemical elements into near-ore metasomatic haloes, mathematical computing of the analyses results (content oreogenous elements).

**The results of the research.** The author made the conclusion on geology-genetic uniformity of mesothermal gold deposits formed into crystalline substratum and black shales. The following facts: 1) control of gold deposits by deep faults; 2) similar geologic age of early plutons, massifs of palinogenetic granitoids with large accompanying dikes of average-soured rocks and late dikes of the moderately-alkaline dolerites, dolerites, leucodolerites of tillore, insideore, afterore generations, including transformed into hightemperature biotite-amphibole hornblende metasomatites of insideore dikes- fluidconductors, and ores; 3) authentic mineral-petrochemic zoning of the near-ore metasomatic haloes in both substratum, formed in conditions of potassium-sulphurously-carbon-dioxidic metasomatism of propilite-beresitic type with entrance into haloes of potassium, restoring sulphur, carbon dioxide, removal of sodium and partly silicium; 4) inheritance by the nearore metasomatites of the petrochemic type insidedoleritic metasomatism and contrasting anomalies of the femic (Mg, Fe, P, Ti) elements; 5) isotopic relations of sulphides sulphur and carbonates carbon of ores and nearore metasomatites meeting the meteoritic standard (the mantle), prove the conclusion. The enumerated facts eliminate the participation of metamorphism in ore formation.

In Lensk region, as well as in others goldore regions of mountain-folded Siberian craton frame, mesothermal gold deposits are formed into antidiromic granite-diorite-dolerite fluid-ore-magmatic complexes composition at late basic stage of their function, and insideore dikes-fluid conductors of moderately-alkaline dolerites are the link between basic hearthes of mantle – the sources of gold-bearing solutions, and deposits in the crust.

**Paper structure.** The 3<sup>rd</sup> part of the paper has the following sections: subject of the problems and the formulation of the task; mineral-petrochemic zoning of the nearore propilite-beresitic type metasomatic haloes in mesothermal gold deposits formed into crystalline substratum and black shales series; mineral-petrochemic zoning of the gold deposit Sukhoi Log nearore metasomatic haloe. In the 4<sup>th</sup> part of the paper there are the following sections: the distribution of oreogenous elements into nearore expanse of the mesothermal gold deposits formed into crystalline substratum and black shales series; the discussion of the results, conclusion and references.

### Key words:

Mesothermal gold deposits, crystalline substratum, black shales, magmatism, metamorphism, ore formation, human factor.

### REFERENCES

1. Kucherenko I.V. Ore geology problems and the human factor. Part 1. Mineral-petrochemic zoning of the near-veins metasomatic aureoles in the mesothermal gold deposits: theory, experiment, nature. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 105–118. In Rus.
2. Kucherenko I.V. Ore geology problems and the human factor. Part 2. Magmatism and mesothermal ore-formation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 6, pp. 148–170. In Rus.
3. Buryak V.A., Letnikov F.A. O roli protsessov regionalnogo metamorfizma i ultrametamorfizma v razvitii zolotogo orudneniya [Role of regional metamorphism and ultrametamorphism in development of gold ore formation]. *Voprosy geologii mestorozhdeniy zolota* [The problems of the gold deposits geology]. Tomsk, Tomsk Polytechnic Institute Publ., 1970, pp. 19–24.
4. Buryak V.A. Geneticheskaya model metamorfogenno-gidrotermalnogo rudoobrazovaniya [The genetic model of metamorpho-genetic hydrothermal ore-formation]. *Geneticheskie modeli endogennykh rudnykh formatsiy* [The genetic models of the endogenous ore formations]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983, vol. 2, pp. 139–145.
5. Brand N.W., Bottrell S.H., Miller M.F. Concentration of reduced sulphur in inclusions fluids associated with black shales hosted quartz veins gold deposits: implications for mechanisms of transport and deposition of gold and a possible exploration tool. *Applied Geochemistry*, 1989, vol. 4, Iss. 5, pp. 483–491.
6. Nelson C.E. Comparative geochemistry of jasperoids from Carlin-type gold deposits of the western United States. *Journal of Geochemical Exploration*, 1990, vol. 36, Iss. 1–3, pp. 171–195.
7. Shepherd T.J., Bottrell S.H., Miller M.F. Fluid inclusion volatiles as an exploration guide to black shale-hosted gold deposits, Dalgellau gold belt, North Wales, UK. *Journal of Geochemical Exploration*, 1991, vol. 42, Iss. 1, pp. 5–24.
8. Nemerov V.K., Spiridonov A.M., Razvozhayeva E.R., Matel N.L., Budyak A.E., Stanevich A.M. The ontogenesis main factors of the noble metals deposits of the Sukhoi log type. *Domestic geology*, 2005, no. 3, pp. 17–24. In Rus.

9. Selvaraja V., Fiorentini M.L., Jeon H., Savard D.D., Laflamme C.K., Guagliardo P., Caruso S., Bui Thi-Hao. Evidence of local sourcing of sulphur and gold in an Archaean sediment-hosted gold deposit. *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 89, pp. 909–930.
10. Laverov N.P., Chernyshov I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Goltsman Yu.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A. Etapy formirovaniya krupnomasshtabnoy blagorodnometalnoy mineralizatsii mestorozhdeniya Sukhoi Log (Vostochnaya Sibir): rezultaty izotopno-geokhronologicheskogo izucheniya [The stages of formation of the large-scale noble-metal mineralization into Sukhoi Log deposit (Eastern Siberia): isotope-geochronological study results]. *Papers of RAC*, 2007, vol. 415, no. 2, pp. 236–241.
11. Rundkvist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N., Smirnov M.Yu., Danilova M.Yu., Ashheulov A.A. Etapy formirovaniya Bodaybinskogo zolotorudnogo rayona [The stages of Bodaibo gold-ore region formation]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 1992, vol. 34, no. 6, pp. 3–15.
12. Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Spiridonov A.M., Nemerov V.K., Mitrofanov G.L. Geodinamicheskie usloviya formirovaniya zolotorudnykh mestorozhdeniy Bodaybinskogo neoproterozoyskogo progiba [Geodynamic conditions of formation of Bodaibo Proterozoic trough gold-ore deposits]. *Papers of RAC*, 2006, vol. 407, no. 6, pp. 793–797.
13. Ivanov A.I. The part of metamorphic conditions of the carbonaceous carbon-bearing-terrigenous sediments for gold mineralization formation during different stages of the Baikal-Patom metallogenic province. *Domestic geology*, 2017, no. 4, pp. 3–23. In Rus.
14. Kryazhev S.G. *Geneticheskie modeli i kriterii prognoza zolotorudnykh mestorozhdeniy v uglerodisto-terrigennykh kompleksakh*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [The genetic models and forecast criteria of the gold-ore deposits into carbonaceous-terrigenous complexes. Dr. Diss. Abstract]. Moscow, 2017. 52 p.
15. Kryazhev S.G. Isotopic-geochemic and genetic models of the gold-ore deposits into the carbon-bearing-terrigenous series. *Domestic geology*, 2017, no. 1, pp. 28–38. In Rus.
16. Arifulov Ch.Kh., Kryazhev S.G., Arsenteva I.V., Imamendinova M.A., Tsybalyuk N.V. Auriferous lithologic-stratigraphic levels and conditions of the streaky-impregnated ores localization in Khanchanskii and Upper Khatynnan-Olbotskii ore nodes (Magadanskii region). *Domestic geology*, 2017, no. 4, pp. 24–43. In Rus.
17. Daminov B.B. *Tipy blagorodnometalnogo orudneniya yugo-vostochnoy chasti Vostochnogo Sayana: sostav, usloviya formirovaniya, genesis*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [The types of the noble-metal mineralization of South-Eastern part of East Eastern Sayan: composition, conditions of formation, genesis. Dr. Diss. Abstract]. Ulan-Ude, 2018. 52 p.
18. Sizykh A.I., Yudenko M.A. Metamorfizm i metamorfogennoe rudobrazovanie Tyysko-Olokitskogo metamorficheskogo poyasa Severnogo Priбайkalya [Metamorphism and metamorphogenous ore-formation of the Northern Transbaikalia Tyysko-Olokitskii metamorphic belt]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Vostochnoy Sibiri* [Geology and minerals of Eastern Siberia]. Ed. by A.I. Sizykh. Irkutsk, Irkutsk State University Press, 2013. pp. 68–78.
19. Palenova E.E. *Mineralogiya mestorozhdeniy zolota Kopylovskoe, Kavkaz, Krasnoe (Artemovskiy rudnyy uzel, Bodaybinskiy rayon)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Mineralogy of the gold deposits Kopylovskoe, Kavkaz, Krasnoe (Artemovskiy ore node, Bodaybinskiy region). Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2015. 22 p.
20. Yalovik G.A. *Geologo-strukturnye i veshchestvennye osobennosti zolotorudnykh mestorozhdeniy v sharyazhno-nadvigovykh strukturakh Yano-Kolymskogo i Mongolo-Okhotskogo orogennykh poyasov (na primere Badranskogo, Kariyskogo i Pilnenskogo mestorozhdeniy)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Geologic, structural and material peculiarities of the gold-ore deposits in the overthrust sheet-overlap textures of Yano-Kolymskii and Mongolo-Okhotskii orogenic nodes (for example Badranskoe, Kariyskoe and Pilnenskoe deposits). Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2016. 22 p.
21. Jianping Wang, Jiajun Liu, Runmin Peng, Zhenjiang Liu, Baisheng Zhao, Zan Li, Yufeng Wang, Liu Chonghao. Gold mineralization in Proterozoic black shales: Example from the Haoyao-erhudong gold deposit, Northern margin of the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 63, pp. 150–159.
22. Mezhubovskiy V.V. *Geologiya i zolotonosnost Gerfed-Nikolaevskoy rudnoy zony (Eniseyskiy kryazh)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Geology and the gold-bearing of the Gerfed-Nikolaevskaya ore zone (Eniseyskiy ridge). Cand. Diss. Abstract]. Krasnoyarsk, 2017. 24 p.
23. Buryak V.A. *Metamorfizm i rudobrazovanie* [Metamorphism and ore-formation]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p.
24. Zlobin V.A. Geokhimicheskie osobennosti rudovmeshchayushchikh chernoslantsevyykh tolshch Eniseyskogo kryazha [Geochemic peculiarities of the ore-bearing black shales terranes of Eniseyskiy ridge]. *Mikroelementny sostav osadochnykh tolshch kak pokazatel usloviy ikh formirovaniya* [Microelement composition of the sedimentary terranes as indicator of conditions their formation]. Novosibirsk, IGIG SO AN SSSR Publ., 1989. pp. 105–142.
25. Sintsov A.V., Lobanov M.P., Sizykh V.I. Metalliferous carbonaceous shales of Lenskii auriferous region. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 2003, no. 1, pp. 27–37. In Rus.
26. Marchenko L.G., Yartseva L.A., Xueqiu Wang. Black shale terranes as the source of gold and platinum. *Geologiya i okhrana nedr*, 2005, no. 2, pp. 40–44. In Rus.
27. Buryak V.A., Goncharov V.I., Goryachev N.A., Tsybalyuk N.V., Abissalov E.G. Relationships between gold-quartz veins and disseminated PGM-bearing gold-sulfide mineralization in black-shales. *Doklady Earth Sciences*, 2005, vol. 400, Iss. 1, pp. 1–4.
28. Wang D., Sheng Y., Mathur R., Jiang J., Shang S., Sheng J., Yu M. Multiple mineralization events in the Zhaxikand Sb-Pb-Zn-Ag deposit and their relationship with the geodynamic evolution in the North Himalayan Metallogenic Belt, South Tibet. *Ore geology Reviews*, 2019, vol. 105, pp. 201–215.
29. Arifulov Ch.Kh. Gold-bearing of the black shales terranes and formation situations of ore bodies. *Rudy i metally*, 2010, no. 1, pp. 10–21. In Rus.
30. Khanchuk A.I., Plyusnina L.P., Nikitenko E.M. The Noble Metal Distribution in the black shales of the Degdekan Gold deposit in Northeast Russia. *Russian journal of Pacific Geology*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 89–96.
31. Buryak V.A., Goncharov V.I., Goryachev N.A. Evolyutsionny ryad krupnoobemnykh zoloto-platinoidnykh mestorozhdeniy v uglerodistykh tolshchakh [Evolutionary raw of the gold-platinoid deposits into carbonaceous terranes]. *Papers of RAC*, 2002, vol. 387, no. 4, pp. 512–515.
32. Vasilyeva I.E., Shabanova E.V., Razvozaeva E.A. Noble metals in the insoluble carbonaceous substance of black shales and ores: Direct atomic emission data. *Geochemistry International*, 2012, vol. 50, no. 9, pp. 771–776.
33. Abramov B.N. The formation of black shale gold deposits in the southern environs of the Siberian Platform (Kodaro-Udokanskaya and Tallai-Karalonskaya zones). *Doklady Earth Sciences*, 2013, vol. 449, no. 2, pp. 371–374.
34. Thomas H.V., Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V., Berry R.F., Fraser R., Fround S., Moye R. Pyrite and pyrrhotite textures and composition in sediments, laminated quartz veins, and reefs at Bendigo gold mine, Australia: Insights for ore genesis. *Economic Geology*, 2011, vol. 106, Iss. 1, pp. 1–31.
35. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A. Relationship between metamorphism and ore formation at the Sukhoi Log gold deposit hosted in black slates from the data of U-Th-Pb isotopic SHRIMP-dating of accessory minerals. *Geology of ore deposits*, 2011, vol. 53, Iss. 1, pp. 27–57.

36. Xu L., Lehmann B., Mao J. Seawater contribution to polymetallic Ni-Mo-PGE-Au mineralization in early Cambrian black shales of South China: evidence from Mo isotope, PGE, TRACE element and REE Geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 2013, vol. 52, pp. 66–84.
37. Pasava J., Vymazalova A., Dobes P. The importance of black shales in the origin of the Amantaytau orogenic gold deposit in Uzbekistan: evidence from pyrite chemistry and sulphur isotope data. *Mineral Deposita research for a High Tech World*, 2013, vol. 1–4, pp. 1174–1177.
38. Pires G.L.C., Renac C., Bongioiolo E.M., Neumann R., Barats A. P-T-X conditions on the genesis of orogenic Au (As, Bi, Ag) deposit in metasedimentary rocks of the Buracao Area, Arai Group, Brasilia Fold Belt, Brasil. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 105, pp. 163–182.
39. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiev N.N. Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, 2015, no. 7, pp. 453–481. DOI: 10.1016/j.gsf.2015.07.010.
40. Steadman J.A., Large R.R., Meffre S., Olin P.H., Danyushevsky L.V., Gregory D.D., Belousov I., Lounejeva E., Ireland T.R., Holden P. Synsedimentary to early diagenetic gold in black shale-hosted pyrite nodules at the Golden Mile deposit, Kalgoorlie, Western Australia. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, no. 5, pp. 1157–1191.
41. Groves D.L., Santosh M. The giant Jiaodong gold province: the Key to a unified model for orogenic gold deposits? *Geoscience Frontiers*, 2016, no. 7, pp. 409–417.
42. Volkov A.V., Murashov K.Y., Sidorov A.A. Geochemical peculiarities of ores from the largest Natalka gold deposit in North-Eastern Russia. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 466, no. 2, pp. 161–164.
43. Konkin V.D., Ivanov A.I., Kotelnikov E.E., Vasyukov V.E., Zakharov I.O. To methods of the forecast resources valuation of ore gold in carbonaceous carbon-bearing-terrigenous sediments of Bodaibo ore region. *Domestic geology*, 2017, no. 4, pp. 64–80. In Rus.
44. Anh T.T., Hoa T.T., Dung P.T., Li V.H., Mai N.T., Gaskov I.V., Borisenko A.S., Izokh A.E. Ta Nang gold deposit in the black shales of Central Vietnam. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, Iss. 10, pp. 1414–1427.
45. Vasileva I.E., Shabanova E.V., Goryacheva E.M., Sotskaya O.T., Labusov V.A., Dzyuba A.A., Nekludov O.A. Noble metals in black shales of the Sukhoi Log gold deposit (East Siberia): evidence from scintillation arc atomic-emission spectrometry. *Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 8, pp. 997–1009.
46. Umarbekova Z., Seltmann R., Dyussebaeva K., Kokkuzova M. The gold ore deposit Bakyrchic and views on the formation of the mineral deposits in black shale strata. *Proc. of the 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 2017, vol. 17, Iss. 11, pp. 1111–1118; DOI: 10.5593/sgem2017/11/S04.142 Available at: [www.sgem.org](http://www.sgem.org) (accessed 20 April 2019).
47. Steadman J.A., Large R.R. Synsedimentary, diagenetic and metamorphic pyrite, pyrrhotite and marcasite at the Homestake BIF-hosted gold deposit, South Dakota, USA: Insights on Au-As ore genesis from textural and LA-ICP-MS trace element studies. *Economic Geology*, 2016, vol. 111, Iss. 7, pp. 1731–1752.
48. Parnell J., Perez M., Armstrong J., Bullock L., Feldmann J., Boyce A.J. A black shale protolith for gold-tellurium mineralization in the Dalradian Supergroup (Neoproterozoic) of Britain and Ireland. *Applied Earth Science*, 2017, vol. 126, no. 4, pp. 161–175. Available at: <https://doi.org/10.1080/03717453.2017.1404682> (accessed 20 April 2019).
49. Tatarinov A.V., Yalovic L.I., Vanin V.A. Spherical microparticles from gold-bearing quartz veins of the Irokinda deposit, Western Transbaikalia. *Geodynamics and Tectonophysics Open Access*, 2016, vol. 7, Iss. 4, pp. 651–662.
50. Augustin J., Gaboury D. Multi-stage and multi-sourced fluid and gold in the formation of orogenic gold deposits in the world-class Mana district of Burkina Faso-Revealed by LA-ICP-MS analysis of pyrites and arsenopyrites. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 104, pp. 495–521.
51. Damdinov B.B., Damdinova L.B. Zun-Ospa gold deposit, Eastern Sayan: Geology, ore composition and genesis. *Geology of ore deposits*, 2018, vol. 60, Iss. 3, pp. 241–264.
52. Mishra B., Pruseth K.L., Nazari P., Chinnasamy S.S. Nature and source of the ore-forming fluids associated with orogenic gold deposits in the Dharwar craton. *Geoscience Frontiers*, 2018, vol. 9, Iss. 3, pp. 715–726.
53. Hakim A.Y.A., Melcher F., Prochaska W., Bakker R., Rantitsch G. Formation of epizonal gold mineralization within the Latimojong metamorphic complex, Sulawesi, Indonesia: Evidence from mineralogy, fluid inclusions and Raman spectroscopy. *Ore Geology reviews*, 2018, vol. 97, pp. 88–108.
54. Kondratieva L.A., Anisimova G.S., Zaitsev A.I. The Zaderzhninskoe gold deposit: mineral composition, fluid inclusions and age (South Verkhoyansk region). *Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, Iss. 10, pp. 1288–1300.
55. Gamyanin G.N., Fridovsky V.Y., Vikenteva O.V. Noble metal mineralization of the Adycha-Taryn metallogenic zone: Geochemistry of stable isotopes, fluid regime and ore formation conditions. *Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, Iss. 10, pp. 1271–1287.
56. Oliver N.H.S., Thomson B., Freitas-Silva F.H., Holcombe R.J., Rusk B., Almeida B.S., Faure K., Davidson G.R., Esper E.L., Guimarães P.J., Dardenne M.A. Local and regional mass transfer during trusting, veining and boudinage in the genesis of the giant shale-hosted Paracatu gold deposit, Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, Iss. 7, pp. 1803–1834.
57. Palenova E.E., Belogub E.V., Plotinskaya O.Y., Novoselov K.A., Maslennikov V.V., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Kuzmenko A.A., Griboedova I.G. Chemical evolution of pyrite at the Kopylovsky and Kavkaz black shale-hosted gold deposits, Bodaybo district, Russia: Evidence from EPMA and LA-ICP-MS data. *Geology of ore deposits*, 2015, vol. 57, Iss. 1, pp. 64–84.
58. Rauchenstein-Martinek K., Wagner T., Walle M., Heinrich C.A. Gold concentrations in metamorphic fluids: a LA-ICP-MS study of fluid inclusions from the Alpine orogenic belt. *Chemical Geology*, 2014, vol. 385, pp. 70–83.
59. Steadman J.A., Large R.R., Meffre S., Bull S.W. Age, origin and significance of nodular sulfides in 2680 Ma carbonaceous black shale of the Eastern Goldfields Superterrane, Yilgarn Craton, Western Australia. *Precambrian Research*, 2013, vol. 230, pp. 227–247.
60. Large R.R., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for carbin-type and orogenic gold deposits. *Economic Geology*, 2011, vol. 106, Iss. 3, pp. 331–358.
61. Zharikov V.A. Nekotorye zakonomernosti metasomaticheskikh protsessov [Some regularities of metasomatic processes]. *Metasomaticheskie izmeneniya bokovykh porod i ikh rol v rudoobrazovanii* [Metasomatic alterations of the lateral rocks and their part in ore formation]. Moscow, Nedra Publ., 1966. pp. 47–63.
62. Plyushchev E.V. Gidrotermalno-metasomaticheskoe mineraloobrazovanie kak regionalnoe geologicheskoe yavlenie i ego metallo-genicheskoe znachenie [Hydrothermal-metasomatic mineral formation as regional geologic phenomenon and its metallogenetic meaning]. *Geokhimicheskie metody pri poiskakh skrytogo orudneniya* [Geochemic methods in prospecting concealed mineralization]. Moscow, Nauka Publ., 1984. pp. 11–20.
63. Sher S.D. Okolorudnye izmeneniya, sopushtstvuyushchie zoloto-kvartsevym zhilam v Lenskom zolotonosnom rayone [Near-ore changings accompanying gold-quartz veins in Lenskii auriferous]. *Metasomaticheskie izmeneniya bokovykh porod i ikh rol v rudoobrazovanii* [Metasomatic alterations of the lateral rocks and their part in ore formation]. Moscow, Nedra Publ., 1966. pp. 282–291.

64. Konovalov I.V. Near-ore zoning of one gold-ore deposit (Lenskii region). *Geologiya i geofizika*, 1973, no. 1, pp. 123–125. In Rus.
65. Shmotov A.P. Tektonicheskie deformatsii i sopryazhennye s nimi gidrotermalno-metasomaticheskie preobrazovaniya vmeshchayushchikh porod (Lenskiy zolotonosny rayon) [Tectonic deformations and hydrothermal metasomatic alterations of the containing rocks associated with them (Lenskii auriferous region)]. *Papers of AC SSSR*, 1974, vol. 218, no. 1, pp. 178–181.
66. Sharov V.N., Shmotov A.P., Konovalov I.V. *Metasomaticheskaya zonalnost i svyaz s ney orudneniya* [Metasomatic zoning and relation of mineralization to it]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1978. 103 p.
67. Rusinov V.L., Rusinova O.V., Kryazhev S.G. Near ore metasomatism of the terrigenous carbonaceous rocks in Lenskii auriferous region. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, 2008, vol. 50, no. 1, pp. 3–46. In Rus.
68. Namolov E.A., Chirkova V.M. Tipomorfnye assotsiatsii i regionalnaya mineralnaya zonalnost zoloto-kvartsevykh zhil Bodaybinskogo rudnogo rayona [Typomorphic association and regional mineral zoning of the gold-quartz veins of Bodaybinskiy ore region]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Vostochnoy Sibiri. Tezisy dokladov regionalnoy nauchnoy konferentsii* [Geology and minerals of Eastern Siberia. Papers abstracts of the regional scientific conference]. Irkutsk, 1986. pp. 62–63.
69. Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhovzin A.V. Petrologic geochemic features of the near ore metasomatism in gold-ore deposit Sukhoi Log (Lenskii region). Part 2. Petrologia of near-ore metasomatism. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 28–37. In Rus.
70. Gavrilov A.M., Kryazhev S.G. Mineral-geochemic ores peculiarities of the deposit Sukhoi Log. *Razvedka i okhrana neдр*, 2008, no. 8, pp. 3–16. In Rus.

Received: 24 April 2019.

#### Information about the authors

**Igor V. Kucherenko**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.98(479.24): 550.8.072

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ И НЕФТЕГАЗОНОСНОСТЬ ЛОКАЛЬНЫХ ПОДНЯТИЙ БАКИНСКОГО АРХИПЕЛАГА ЮЖНО-КАСПИЙСКОГО БАСЕЙНА

Нариманов Нариман Рустам оглы<sup>1</sup>,  
nariman.narimanov40@asoiu.edu.az

Мухтарова Хураман Зиядхан гызы<sup>1</sup>,  
mukhtarova.khuraman@mail.ru

Насибова Гюльтер Джумшуд гызы<sup>1</sup>,  
gultar\_nasibova\_1@yahoo.com

<sup>1</sup> Азербайджанский Государственный Университет Нефти и Промышленности,  
Азербайджан, AZE1010, г. Баку, пр. Азадлыг, 20.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью расширения ресурсной базы углеводородов западного борта Южно-Каспийского бассейна и увеличения добычи на некоторых нефтегазовых месторождениях Бакинского Архипелага. Эти исследования могут предоставить более достоверную информацию по изучаемым структурам, а полученные результаты могут способствовать дальнейшему открытию новых структур с углеводородным потенциалом именно в этой зоне Южно-Каспийского бассейна.

**Цель:** определение характера развития структур Аран-дениз, Дашлы, Сабаиль, палеогеографических, термобарических условий и скорости осадконакопления для оценки перспектив нефтегазоносности изучаемой зоны.

**Методы.** С помощью компьютерных программ проведена палеотектоническая и палеогеографическая реконструкция исследуемого региона и на основе накопленных палеогеографических данных построена тектоническая модель, отражающая палеотектонические особенности изучаемой территории, а также зоны осадконакопления.

**Результаты.** Были построены и проанализированы: схематическая карта, палеогеографическая гистограмма, графики скорости осадконакопления отдельных структур, палеотектонические профили, диаграмма изменения высоты складок в зависимости от времени. Исследования дали основание для нижеследующих выводов: изучение истории геологического развития локальных структур Аран-дениз, Дашлы и Сабаиль показало, что их развитие имеет конседиментационный характер; изучение палеогеографических условий и скорости осадконакопления по отдельным стратиграфическим единицам установило наличие благоприятных палеогеографических условий для накопления в потенциальных нефтематеринских породах разреза органического вещества выше кларкового числа; осложнение локальных структур грязевым вулканизмом дает возможность прийти к выводу о том, что на территории существовали достаточно благоприятные термобарические условия для генерации потенциальными нефтематеринскими пластами нефти и газа.

### Ключевые слова:

Бассейн, структура, перспективность, литология, углеводород, порода, впадина, нарушение, свита, месторождение.

### Введение

Осложненные грязевым вулканизмом структуры Аран-дениз-Дашлы и Сабаиль расположены в центральной части Бакинского архипелага в антиклинальной тектонической зоне Хамамдаг-Азизбеков. Как известно, Хамамдаг-Азизбековская тектоническая зона находится в Алятской гряде юго-восточного Гобустана и протягивается в море на более чем 50 км от Пирсаатского мыса [1–5].

Антиклинальная зона объединяет в себе следующие структуры: Хамамдаг, Гарасу, Ульфат, Санги-Мугань, Аран-дениз, Дашлы, Сабаиль, Нахичевань и Азизбеков, которые осложнены разломами различных направлений: поперечными, продольными, радиальными, и, помимо этого, ситуация усугубляется наличием грязевых вулканов [6, 7]. Надо отметить, что продольные разломы прослеживаются по всей зоне и имеют региональный характер. Разломы в молодых породах имеют относительно мелкие амплитуды. Сводная часть

этих структур, которые имеют в юго-восточном направлении ступенчато-блоковое тектоническое строение, сильно осложнена разломами (рис. 1).

По данным проведенных различных геолого-исследовательских работ (картирование, структурно-разведочное и разведочное бурение) были изучены породы стратиграфических комплексов четвертичного периода и палеогена, которые участвуют в геологическом строении структур Аран-дениз, Дашлы и Сабаиль [3–5, 8, 9].

Поднятие Аран-дениз расположено к юго-востоку от поднятия Гарасу, и, горизонтально перемещаясь в юго-западном направлении, кулисообразно соединяется с ним. Структура Аран-дениз асимметрична: юго-западное крыло характеризуется более крутым, по сравнению с северо-восточным (угол залегания 10–30°), углом залегания в 20–35°. Короткая северо-западная периклиналь структуры залегает под углом приблизительно в 30–32° и является более крутой, а юго-восточная периклиналь – продолговатая и пологая (18–20°) (рис. 1, 2, а).



Рис. 1. Обзорная структурно-тектоническая схема Бакинского архипелага

Fig. 1. General structural-tectonic map of the Baku Archipelago

Как видно из структурно-тектонической карты, пласты, особенно верхнего отдела продуктивной толщи (ПТ), сильно осложнены региональными разломами и грязевым вулканизмом, что является основной причиной усугубления ситуации. Судя по пластам верхнего отдела ПТ, обнажающимся на дневной поверхности в сводовой части структуры, ее размеры составляют  $3 \times 4,5$  км.

Брахиморфная структура Дашлы расположена между структурами Аран-дениз и Сабаиль. По подошве ачкагильского яруса данное поднятие представляет собой слегка асимметричную складку северо-запад—юго-восточного простирания, характеризующуюся относительно круто ( $20\text{--}25^\circ$ ) залегающим юго-западным и пологим северо-восточным крыльями. Размеры складки  $9 \times 4,5$  км по стратеоизогипсе 1200 м свидетельствуют о том, что данное поднятие является короткой брахискладкой, близкой к изометричной [10–12].

Структура осложнена продольными и поперечными разломами. Гипсометрически более низкое,

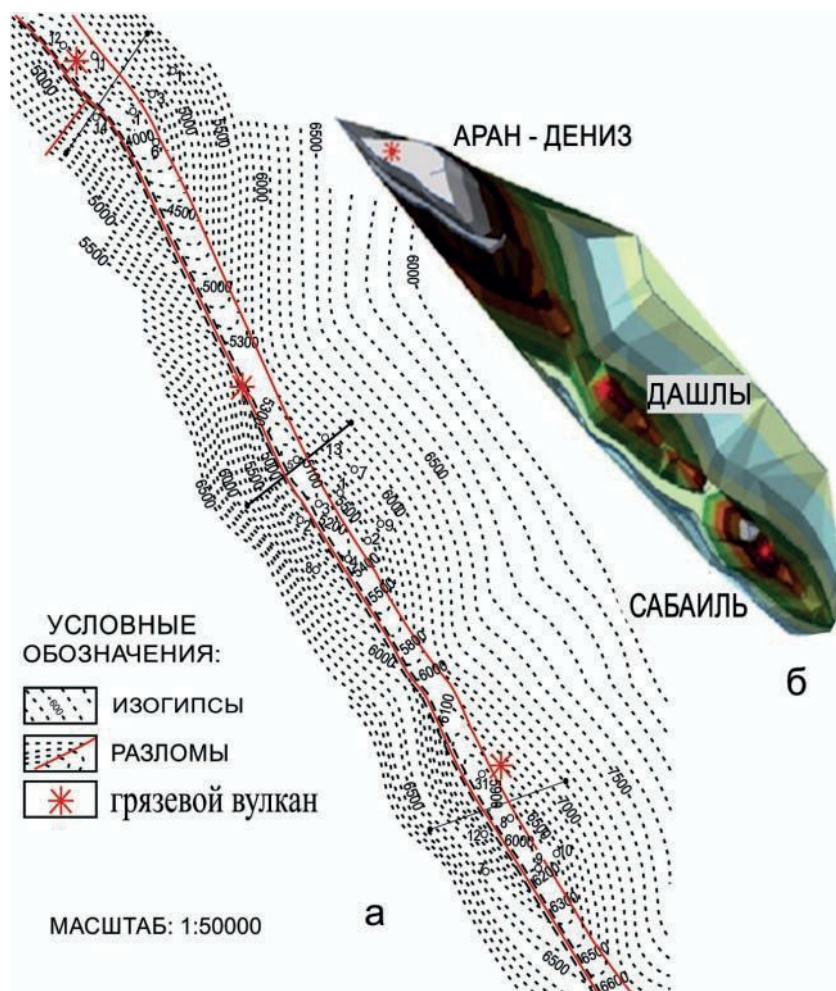


Рис. 2. Антиклинальная зона Аран-дениз–Дашлы–Сабаиль. Структурная карта (а) и тектоническая модель (б) по кровле свиты «Фасила» на основе палеогеографических данных

Fig. 2. Aran-denis–Dashli–Sabail anticline zone. Structural map (a) and tectonic model (б) for the top of the «Fasila» suite based on paleogeographic data

по отношению к соседним блокам, положение центрального тектонического блока продольного простирания, расположенного в сводовой части складки вдоль продольных разломов, создает систему тектонических блоков грабенового типа [13–15].

Надо отметить, что вся зона Аран-дениз-Дашлы расчленена продольными разломами на три блока: юго-западный (юго-западное крыло), центральный (приосевая часть) и северо-восточный (северо-восточное крыло) (рис. 2, а, б).

Изучаемая третья антиклинальная структура Сабаиль расположена юго-восточнее структуры Аран-дениз и относится к Хамамдаг-дениз-Сабаильской антиклинальной линии, которая простирается с севера-запада на юго-восток. Это поднятие является антиклинальной складкой северо-западно-юго-восточного простирания. Размеры этой относительно малоизученной структуры, по предполагаемой изолинии в 1300 м, а также изолинии в 1500 м, приблизительно составляют 7×3,5 км. Предположительная амплитуда разломов колеблется между 350–400 м. Горизонты верхнего отдела ПТ (нижний плиоцен) залегают на глубине 1000 м, и вероятная мощность этих отложений составляет приблизительно 4600–4700 м (рис. 2, б) [16].

#### Методы

Для детального изучения и оценки нефтегазоносности ПТ в Сабаильской антиклинали в 1991 г. было начато бурение скважины с проектной глубиной 6200 м, седьмой горизонт был вскрыт на интервале 5857–5982 м. При опробовании объекта на глубине 5972–5975 м получена пластовая вода с растворенным в ней газом дебитом 700 м<sup>3</sup>/сут. [12, 13].

По промыслово-геофизическим данным интервал глубин 5968–5977 м оценивался как нефтегазоносный, но, несмотря на это, опробование в данном объекте не проводилось.

Сравнение структур, которые находятся в одной и той же зоне, но на разных антиклинальных

линиях, дает возможность использовать информацию о любой из них в качестве дополнительной.

Все изучаемые структуры осложнены разрывными нарушениями, имеющими свои особенности и отличительные параметры для каждого объекта, что дает возможность утверждать, что палеотектоническая обстановка и развитие, а также доминирующие силы горизонтального либо вертикального характера, участвующие в образовании складок, отличались друг от друга (рис. 2, а, б, 3) [14, 15].

Основной целью исследований является изучение палеогеографических условий и скорости осадконакопления, палеотектонических условий образования складок и разломов, а также оценка нефтегазоносности в эоцен-четвертичный геологический промежуток времени. Одновременно был изучен характер сформировавшихся нефтематеринских, коллекторских пород и покрышек, которые играют важную роль в образовании (при благоприятных термобарических условиях), накоплении и предотвращении разрушения уже сформировавшихся углеводородных залежей, оценены перспективы нефтегазоносности зоны. Комплексно изучая зону с точки зрения нефтегазоносности, особое внимание следует обратить на тектонические процессы, сопровождающиеся осадконакоплением и складкообразованием [15, 17–19].

Для решения поставленных задач был рассмотрен ряд характерных факторов их развития, а полученные данные по изучению палеогеографических условий дают возможность детальной оценки перспективности объектов в целом и отдельных горизонтов ПТ в частности [18, 20, 21].

Для изучения палеогеографических условий осадконакопления нами-проанализирован средне-нормальный литолого-стратиграфический разрез, на основе которого была составлена палеогеографическая гистограмма (рис. 4). Данная гистограмма дала возможность установить палеогеографические условия осадконакопления от эоцена до современного времени (четвертичный век, плейстоцен).

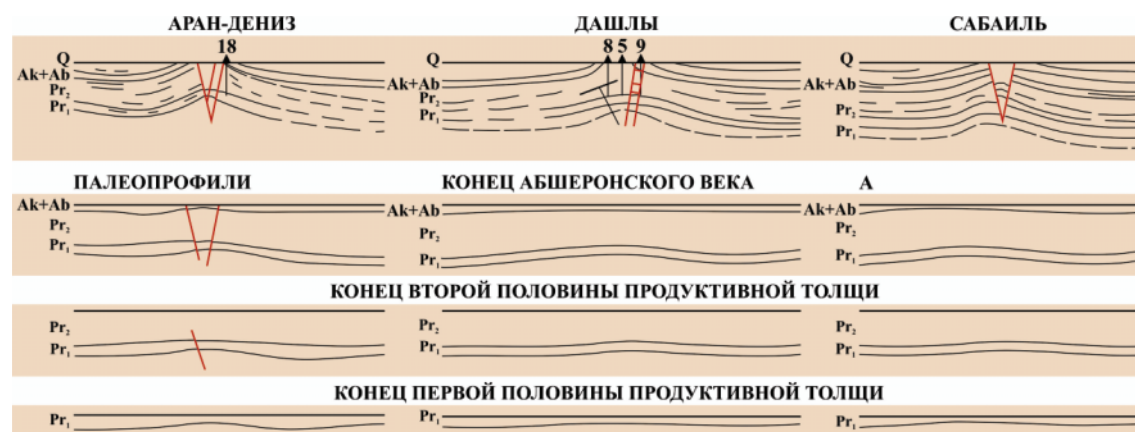


Рис. 3. Палеотектоническое развитие структур Аран-дениз, Дашлы и Сабаиль

Fig. 3. Paleotectonic evolution of the Aran-deniz, Dashli and Sabail structures

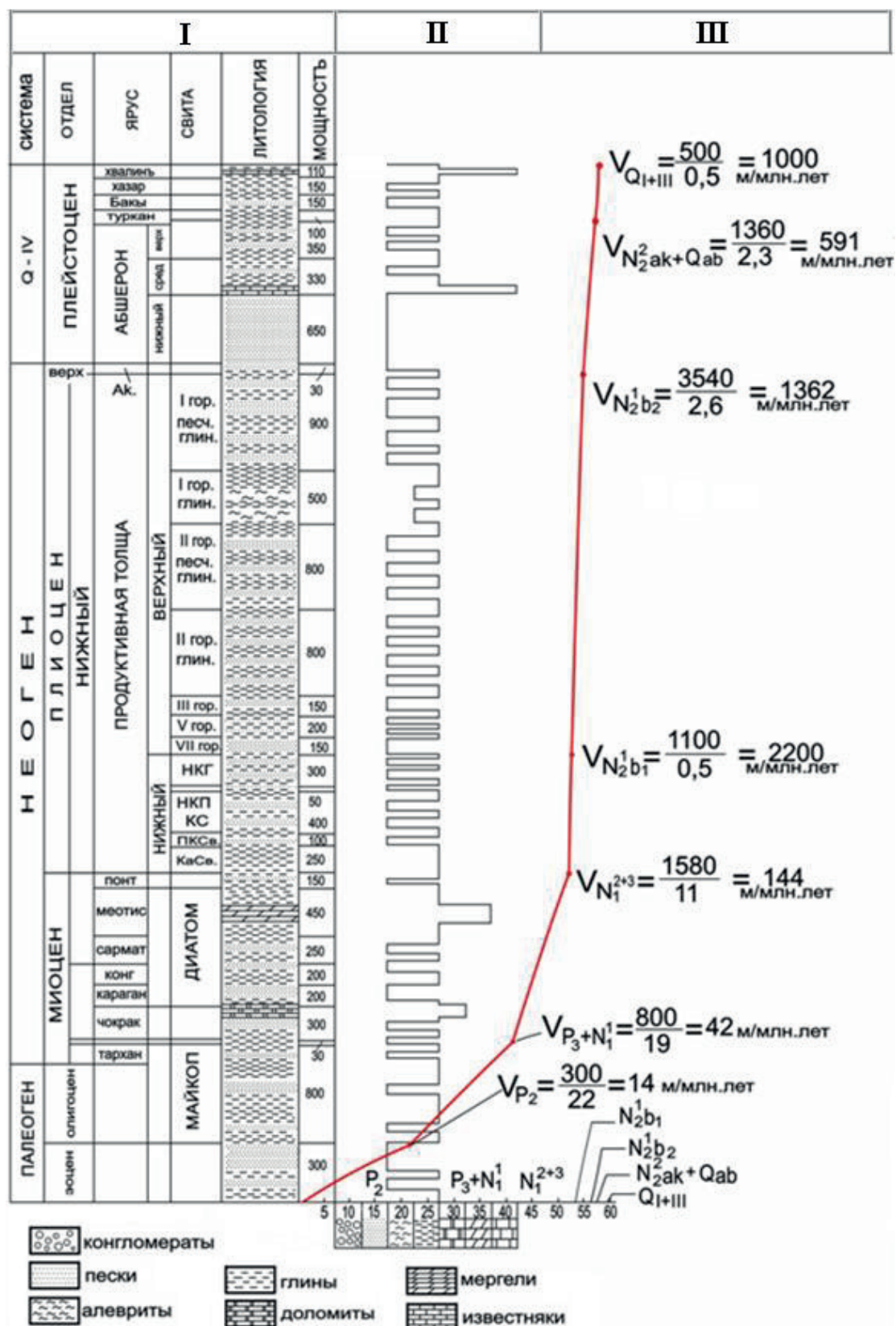


Рис. 4. Палеогеографическая кривая и график интенсивности осадконакопления. I – Средне-нормальный литолого-стратиграфический разрез площадей Аран-дениз, Дашлы, Сабаиль; II – Палеогеографическая кривая; III – график интенсивности осадконакопления

Fig. 4. Paleogeographic curve and the diagram of the deposition rate. I – General normal lithological stratigraphic section of the Aran-deniz, Dashli, Sabaili area; II – Paleogeographic curve; III – Diagram of the deposition rate

### Обсуждение

На палеогеографической гистограмме видно, что глубина бассейна в эоцене была между средней и малой, и именно эти условия способствовали накоплению пелитовой и псаммитовой фаций. В майкопском веке бассейн в основном был средней глубины и была накоплена пелитовая фация большой мощности [17, 22–24].

В начале чокракского века по причине устойчивого воздымания дна бассейна была сформирована псаммитовая фация. В середине и к концу этого века под влиянием неустойчивых тектонических движений разного характера глубина бассейна колебалась между средней и большой величинами и в результате была сформирована сначала пелитовая, а во второй половине века карбонатная фации.

К началу диатомового века бассейн постепенно мелел. Поэтому в караганском полувеке в бассейне существовали положительные условия для формирования псаммитовой фации. Пелитовые отложения конкского возраста, перекрывающие караганские отложения, дают возможность прийти к выводу об относительно углублении бассейна.

В сарматском веке и в начале меотиса дно бассейна ритмично колебалось между мелкой и средней глубиной, разрез сформировался чередованием пелитовых и псаммитовых отложений. Начиная с конца сарматского века до середины понтского глубина бассейна была в основном средней. Но в середине меотиса бассейн начал углубляться и в результате была сформирована карбонатная фация, а следствием кратковременного относительного обмеления бассейна, которое произошло в конце понта, стало накопление пелитовой фации.

Надо отметить, что бассейн, сформировавшийся в калинском веке продуктивной толщи, подвергался воздействию отрицательных тектонических сил, и в результате в этой глубокой котловине с относительно небольшой площадью сформировалась в основном глинистая литофация. Начиная с калинского века вплоть до акчагыльского дна котловины подвергалось ритмическим тектоническим движениям отрицательного и положительного характера.

Подверженность тектоническим движениям приводила к изменению ее глубины, что соответствовало отдельным геологическим векам и полувекам, и, наряду с этим, площадь котловины увеличивалась с каждым новым ритмическим движением. Обобщая происходившее, надо отметить, что в этот промежуток времени была сформирована в основном пелитовая фация, которая чередовалась псаммитовыми пластами.

Начиная с акчагыльского века до конца нижнего абшерона в подвергавшемся воздымательным силам бассейне происходило обмеление, где сформировалась псаммитовая фация, а в начале среднего абшерона под воздействием отрицательных тектонических движений в бассейне произошло резкое углубление, в результате чего за относительно

короткое геологическое время была сформирована карбонатная фация.

В тюрканском и бакинском полувеках дно бассейна устойчиво опускалось, сформировавшиеся здесь глинистые пласты характеризуются значительной мощностью. Начиная со второй половины бакинского до середины хазарского полувеков глубина бассейна ритмически колебалась между средней и малой. В хазарском полувеке бассейн обмелел настолько, что в результате сформировалась псефитовая фация относительно малой мощности. В конце хазарского и в начале хвалынского полувеков глубина бассейна характеризуется колебанием в пределах кратковременного мелководья и относительно большей средней глубины.

Обобщая характер изменчивости палеогеографической кривой, для изучаемого стратиграфического интервала укажем, что глубина бассейна всей зоны исследования колебалась в основном между средней и малой, при относительно доминирующей средней глубине, в результате чего в средне-стратиграфическом разрезе на площадях Аран-дениз-Дашлы и Сабаиль доминирует пелитовая фация.

Как известно, в потенциальных нефтематеринских пластах между концентрацией органического вещества (ОВ) и скоростью осадконакопления существует прямая зависимость. Если скорость осадконакопления изменяется между 20–130 м/млн лет, то в таких бассейнах потенциал нефтематеринских пластов оценивается как высокий, и в этих осадках (породах) количество ОВ достигает, приблизительно, двух процентов. Однако при превышении скорости 1600 м/млн лет концентрация ОВ в осадках начинает уменьшаться [18, 20].

Анализ палеогеографической гистограммы и скорости осадконакопления показывает, что в эоценовую эпоху она не была высокой, т. е. осадконакопление происходило умеренными темпами, составляя 14 м/млн лет (рис. 4). Естественно, при таком темпе осадконакопления количество ОВ в осадках не может быть значительным.

При формировании пород майкопской серии скорость осадконакопления составляла более 42 м/млн лет. Учитывая то, что в это геологическое время в ЮКБ при накоплении осадков дно бассейна погрузилось приблизительно до 400 м и осадки накапливались в бассейне, характеризующемся стоячими условиями, то именно этот период времени и палеогеографические условия можно принять в качестве самых благоприятных для сохранения ОВ в потенциальных нефтематеринских пластах.

Отметим, что в среднем и верхнем миоцене скорость осадконакопления составляла 144 м/млн лет, что является показателем наличия большого количества ОВ, а глинистость диатомовой свиты, которая составляет подавляющую часть всего миоценового периода, указывает на наличие потенциальных нефтематеринских пластов и высокую сохранность ОВ.

В нижнем полувеке ПТ скорость осадконакопления в бассейне составляла 2200 м/млн лет. Этот показатель дает возможность охарактеризовать эту достаточно высокую скорость накопления осадков как неблагоприятную, т. к. при данных условиях количество (концентрация) накопленных и сохранившихся органических веществ в пластах заметно уступало количеству ОВ в породах, сформировавшихся в более благоприятных условиях осадконакопления в течение верхней части нижнего отдела ПТ. При такой большой скорости осадконакопления ОВ накапливалось в недостаточном количестве, чем можно объяснить низкий потенциал генерации УВ в сформировавшихся нефтегазопорождающих образованиях. В верхнем полувеке ПТ скорость осадконакопления составляла 1362 м/млн лет. При такой скорости потенциал нефтематеринских пластов может достичь 10 %, а иногда и более. Как видно из вышеизложенного, в породах ПТ количество органического вещества на порядок больше кларкового числа и эти условия позволяют нефтематеринским породам порождать промышленные запасы нефти. Проведённые исследования показывают, что особенно верхний полурус ПТ пока не полной своей мощностью вошел в главную зону нефтегенерации. По этой причине коллекторы ПТ насыщаются углеводородами в основном за счёт нижележащих (например, майкоп, диатом) нефтегенерирующих пластов, которые в данное геологическое время генерируют углеводороды.

В позднем плиоценовом полувеке, т. е. в акагыльской и абшеронской эпохах, скорость осадконакопления составляла 591 м/млн лет. Как видно из литолого-стратиграфического разреза, осадки, накопленные в этот век, однозначно сложены псаммитовой фацией. Это дает возможность предположить, что, несмотря на высокую скорость осадконакопления, потенциал нефтегазогенерации практически нулевой ввиду отсутствия в разрезе нефтематеринских пластов.

Наконец, изучая породы четвертичных осадков, содержащих нефтематеринские пласты, было установлено, что в данный геологический промежуток скорость осадконакопления составляла приблизительно 1000 м/млн лет. Исследованиями выявлено, что в этих потенциальных нефтематеринских породах был образован углеводородный газ. Однако по причине того, что эти породы в данный момент не были вовлечены в главную зону нефтегенерации, об их потенциале нефтепорождения говорить пока рано.

Из вышеизложенного можно прийти к выводу о том, что в рассматриваемом стратиграфическом интервале к основным нефтегенерирующим комплексам можно отнести майкопские, средне-, верхнемиоценовые породы и ПТ.

Как известно, одним из эффективных методов прогнозирования нефтеносности недр земли является изучение истории развития локальных поднятий [7, 24]. В связи с этим нами проанализирован

ряд палеопрофилей по нижней и верхней ПТ и к концу абшеронского века с использованием данных двух поперечных сейсмогеологических профилей, проходящих по структурам Аран-дениз, Дашлы, Сабаиль. Кроме этого, были построены графики интенсивности развития структур (таблица, рис. 5).

По палеопрофилю к концу нижней продуктивной толщи структуры Аран-дениз видно, что складка была выражена уже в начале ПТ, а это показывает, что в изучаемой зоне поднятие начало свое развитие не позднее начала плиоцена. По этой причине мощность осадков (пластов) нижней ПТ в сводовой части структуры значительно меньше по сравнению с крыльевыми зонами. Надо отметить, что к концу нижней продуктивной толщи высота структуры Аран-дениз достигала 500 м.

Развитие складки продолжалось с меньшей интенсивностью и в верхней ПТ, что можно проследить в разнице мощностей в сводовой и крылевой частях складок. Кроме этого, в верхнем полувеке ПТ сводовая часть структуры была осложнена разрывными нарушениями сбросового характера. Скорость развития структуры, по сравнению с началом века продуктивной толщи, постепенно уменьшалась и в этом полувеке её высота достигала 400 м.

**Таблица.** Изменение высоты складок согласно их развитию в соответствующих стратиграфических единицах

**Table.** Variation of the fold amplitude according to their evolution within corresponding stratigraphic units

| Структуры<br>Structures  | Нижняя ПТ<br>Lower PS |                           | Верхняя ПТ<br>Top PS |                           | Акчагиль<br>Akchagil |                           | Четвертичный век<br>Quaternary century |                           |
|--------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------------------|---------------------------|
|                          | H, м<br>(m)           | T, млн лет<br>mill. years | H, м<br>(m)          | T, млн лет<br>mill. years | H, м<br>(m)          | T, млн лет<br>mill. years | H, м (m)                               | T, млн лет<br>mill. years |
| Аран-дениз<br>Aran-deniz | 500                   |                           | 950                  |                           | 1300                 |                           | 3200                                   |                           |
| Дашлы<br>Dashli          | 400                   | 0,5                       | 650                  | 2,6                       | 1200                 | 1,7                       | 2600                                   | 0,4                       |
| Сабаиль<br>Sabail        | 250                   |                           | 500                  |                           | 1150                 |                           | 2200                                   |                           |

Палеопрофили, которые проясняют ситуацию к концу абшеронского века, показывают, что развитие структуры продолжалось и характеризовалось разностью в интенсивности осадконакопления в крыльях, т. е. осадконакопление на юго-западном крыле проходило относительно более интенсивно, чем на северо-восточном. Интенсивность развития структуры постепенно уменьшалась и это продолжалось как в позднем плиоцене, так и в начале четвертичного века. В результате затухания в развитии структуры, что привело к ее погребению, высота структуры Аран-дениз составила лишь 300 м. Различная интенсивность формирования крыльев могла обусловить наличие взбросового нарушения в сводовой части этой структуры.

Надо отметить, что в четвертичном веке результатом увеличения темпа роста структуры стало об-

разование дополнительных разрывных нарушений разного масштаба и направления в ее присводовой части. В результате интенсивных положительных тектонических движений высота поднятия Аран-дениз в четвертичном веке достигла 2000 м. К тому же в результате высокой скорости воздымания структуры, превосходившей скорость осадконакопления, в сводовой части структуры не присутствуют породы четвертичного века, а около 400 м осадков верхнего плиоцена были размыты.

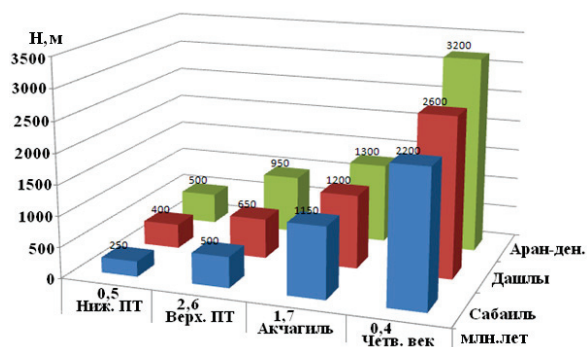


Рис. 5. Диаграмма изменения высоты складок в зависимости от времени

Fig. 5. Chart of the fold amplitude variation as a function of time

Развитие поднятий Дашлы и Сабаиль началось не позже конца миоценового века. Их высота к концу нижней продуктивной толщи достигала 400 м. В верхней продуктивной толще формирование этих структур относительно замедлилось и в результате, к концу этого века, их высота составила, соответственно, 600 и 500 м. Несмотря на то, что в процессе роста этих поднятий скорость структуры Дашлы превосходила скорость структуры Сабаиль, в позднем плиоцене её высота достигала всего лишь 1100 м.

Исследование показывает, что в четвертичном веке скорость воздымания этих двух структур – Дашлы и Сабаиль, резко повысилась.

По сейсмогеологическим профилям в синклинальных впадинах, смежных со структурой Дашлы, мощность четвертичных отложений составляет 2600 м. По профильной линии высота складки Дашлы в настоящее время составляет 2400, а структуры Сабаиль – 2200 м. Однако надо отметить, что рассматриваемая линия профиля не проходит по своду структуры, и поэтому нет возможности судить об истинной ее высоте. Все вышеуказанное наблюдается как в юго-западном, так и в северо-восточном направлениях.

Кроме этого, исследования показывают, что все структуры начали свое развитие уже в конце позднего миоцена и развитие происходило параллельно с осадконакоплением. Такое своеобразное развитие структур оказало свое влияние на специфику локального распределения привнесенного в бассейн осадочного материала. Эти условия стали причинами того, что в синклинальных впадинах вокруг складок были сформированы в основном гли-

нистые образования, тогда как в сводовых и относительно возвышенных частях структур были накоплены пески и песчаники. Кроме этого, в сводовых и присводовых частях антиклиналей скорость осадконакопления пропорционально уменьшалась в соответствии с интенсивностью их развития.

Наряду с этим можно предположить, что средне- и верхнемиоценовые отложения мощностью 2,5–3,0 км создали необходимое геостатическое давление над майкопскими глинами, начавшими адвекцию для запуска механизма поперечного изгиба при нарушении гидростатического равновесия в Южно-Каспийском бассейне (ЮКБ) в пределах Бакинского архипелага [12].

## Результаты

В результате проведенных исследований выяснилось, что нарушение гидростатического равновесия в ЮКБ могло произойти как за счет вертикальных движений отдельных блоков кристаллического фундамента вдоль глубинных разломов, так и за счет напряжений сжатия, возникших в осадочном чехле ЮКБ.

Главной причиной возникновения напряжений сжатия в осадочном чехле ЮКБ являются геодинамические процессы, связанные с зонами коллизии и остаточной субдукции [12, 18].

Анализ палеопрофилей показывает, что начало развития разломных нарушений тектонического характера совпадает с периодом самого интенсивного развития складок. В итоге большинство нарушений, осложняющих локальные структуры, либо начинали свое развитие в четвертичном периоде, либо же были реактивизированы. Этот процесс может стать причиной дегерметизации локальных поднятий. Если эти разрывные нарушения достигают дна бассейна, то они могут сыграть большую роль в разрушении и, возможно, в зависимости от обстановки, в повторном формировании залежей.

Особенности развития изучаемых нами локальных структур дают возможность высоко оценить перспективность их нефтегазоносности. Надо отметить, что складки, подвергшиеся глубокой эрозии и сильно осложненные тектоническими разломами, интересны с точки зрения нефтеносности, а слабо осложненные, или почти не подвергшиеся эрозии могут считаться более благоприятными для формирования в них газовых и газоконденсатных залежей.

## Заключение

1. Изучение истории геологического развития локальных структур Аран-дениз, Дашлы и Сабаиль показало, что их развитие имеет конседиментационный характер.
2. Исследование палеогеографических условий скорости осадконакопления по отдельным стратиграфическим единицам указало на наличие благоприятных палеогеографических условий для накопления в потенциальных нефтемат-

теринских породах разреза органического вещества выше кларкового числа.

3. Осложнение локальных структур грязевым вулканизмом дает возможность прийти к выво-

ду о том, что на территории существовали достаточно благоприятные термобарические условия для порождения потенциальными нефтематеринскими пластами нефти и газа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рахманов И.П. Грязевые вулканы и их значение в прогнозировании нефтегазоносности недр. – М.: Недра, 1987. – 271 с.
2. Бабаев Д.Х., Гаджиев А.Н. Глубинное строение и перспективы нефтегазоносности бассейна Каспийского моря. – Баку, NAF-TA Press, 2006. – 305 с.
3. Абдулгасанова Л.Д., Мамедова С.Р., Аллахвердиев Е.Г. Отчет по площадям Сангачал-дениз-Дуванны-дениз-Харе-Зыря в Бакинском архипелаге по двухмерным (2D) сейсморазведочным работам. – Баку: Кешфийятгеофизика ОП, 2018. – 147 с.
4. Gahramanov G.N. Formation of the oil and gas reservoirs in deep water areas of the South Caspian Depression // Earth Sciences Research Journal. – 2017. – V. 21. – № 4. – P. 169–174. URL: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/esrj/article/view/64008> (дата обращения 28.01.2019).
5. Isgandarov M.M. Some Results of Modeling Electrical Resistivity (on the Example of Deposits of the South-Absheron Aquatic Zone and the Northern Part of the Baku Archipelago) // SOCAR PROCEEDINGS. – 2017. – Iss. 2. – P. 4–12. URL: <http://proceedings.socar.az/az/journal/49> (дата обращения 28.01.2019).
6. Алиев Ад.А. Грязевой вулканизм Южно-Каспийского нефтегазоносного бассейна // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2006. – № 3. – С. 12–21.
7. Mukhtarova K.Z., Nasibova G.J., Ahmadov M.G. The role of South-Eastern Gobustan and Absheron depression clays with rheologically active properties in formation of structures and mud volcanism // American Collocational Researcher Association, Washington Educational Researcher. – 2016, December. – № 9. – P. 673–678.
8. Багир-заде Ф.М., Керимов К.М., Салаев С.Г. Глубинное строение и нефтегазоносность Южно-Каспийской мегавпадины. – Баку, Аз.Гос.Издат., 1987. – 302 с.
9. Каграманов К.Н., Мухтарова Х.З. Факторы, влияющие на формирование резервуаров крупных размеров и условия сохранения залежей нефти и газа на больших глубинах Южно-Каспийской впадины // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2016. – № 3. – С. 25–33.
10. Буниат-заде З.А., Салаев Н.С. Геолого-тектонические условия формирования приразрывных зон нефтегазоаккумуляции в Южном Каспии // Геолог Азербайджана. – 2000. – № 4. – С. 64–72.
11. Высоцкий И.В., Высоцкий В.И. Формирование нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. – М.: Недра, 1986. – 228 с.
12. Нариманов Н.Р., Кулиев К.Г. Изучение истории развития локальных поднятий Бакинского архипелага аналитическим методом // Известия Национальной Академии Наук Азербайджана. Науки о Земле. – 2003. – № 1. – С. 18–24.
13. Керимов В.Ю., Мухтарова Х.З., Мустаев Р.Н. Дизъюнктивные нарушения и их роль в формировании и разрушении залежей нефти и газа в Южном Каспии // Нефть, газ и бизнес. – 2011. – № 6. – С. 18–26.
14. Нариманов Н.Р. Геодинамические аспекты формирования осадочного чехла Южно-Каспийской впадины // Геология нефти и газа. – 2003. – № 6. – С. 7–11.
15. Cenozoic stage of development of local structures of the Lower Kura Depression and Baku Archipelago related to their oil and gas prospects / N.R. Narimanov, N.A. Babayev, G. Gahramanov, Z. Javad-Zadeh // Geological Journal. – 2018. – V. 53. – № 1. – P. 1–12. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/gj.3304> (дата обращения 28.01.2019).
16. Нариманов Н.Р. Влияние геодинамических процессов на нефтегазообразование в Южно-Каспийской впадине // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 2008. – № 8. – С. 13–18.
17. Mamedov P.Z., Babayev D.Kh. South Caspian Megatrough Seismostratigraphy // AAPG International Conference. – Nice, France, 1995. – P. 527–539.
18. Соколов Б.А. Эволюционно-динамические критерии оценки нефтегазоносности недр. – М.: Недра, 1985. – 247 с.
19. Abdullayev E., Leroy S.A.G. Provenance of clay minerals in the sediments from the Pliocene Productive Series, western South Caspian Basin // Marine and petroleum geology. – 2016. – V. 73. – P. 517–527.
20. Вассоевич Н.Б., Баженова О.К., Бурлин Ю.К. Нефтематеринский потенциал осадочных образований // Итоги науки и техники. Сер. Месторождения горючих полезных ископаемых. – 1982. – № 11. – С. 37–43.
21. Selley R.C. Elements of petroleum geology. 2<sup>nd</sup> ed. – London, United Kingdom: Academic Press, 1998. – 479 p.
22. Гамкрелидзе И.П. Мобилизм и проблемы тектоники Кавказа // Проблемы геодинамики Кавказа. – М.: Наука, 1982. – С. 4–8.
23. Geosciences of Azerbaijan / A.A. Alizadeh, I.S. Guliyev, F.A. Kadirov, L.V. Epelbaum // Geology. – 2016. – V. I. – 340 p.
24. Geosciences of Azerbaijan / A.A. Alizadeh, I.S. Guliyev, F.A. Kadirov, L.V. Epelbaum // Economic Geology and Applied Geophysics. – 2017. – V. I. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264817216300599?via%3Dihub> (дата обращения 28.01.2019).

Поступила: 01.02.2019 г.

#### Информация об авторах

**Нариманов Н.Р.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

**Мухтарова Х.З.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

**Насибова Г.Д.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Азербайджанского Государственного Университета Нефти и Промышленности.

UDC 553. 98(479.24): 550.8.072

## GEOLOGICAL EVOLUTION AND OIL AND GAS CONTENT OF LOCAL UPLIFTS OF THE BAKU ARCHIPELAGO OF THE SOUTH CASPIAN BASIN

**Nariman R. Narimanov<sup>1</sup>,**  
nariman.narimanov40@asoiu.edu.az

**Khuraman Z. Mukhtarova<sup>1</sup>,**  
mukhtarova.khuraman@mail.ru

**Gulter J. Nasibova<sup>1</sup>,**  
gultar\_nasibova\_1@yahoo.com

<sup>1</sup> Azerbaijan State Oil and Industry University,  
20, Azadliq avenue, Baku, AZE1010, Azerbaijan.

*The research relevance is backed by the need to expand the resource potential of the western flank of the South Caspian basin and increase production in some oilfields of the Baku Archipelago.*

**The aim** of the research is to determine structural evolution features, paleogeographic, pressure and temperature environment and the deposition rate in order to assess oil and gas opportunities of the area under investigation.

**Methods.** Paleotectonic and paleogeographic reconstruction of the area under investigation were conducted using computer software and a tectonic model of the deposition zone was constructed based on paleogeographic data.

**Results.** The authors have constructed the schematic map, paleogeographic histogram, deposition rate diagrams for individual structures, paleotectonic profiles, a chart of the fold amplitude variation as a function of time and analyzed using computer technologies. The studies allow making the following conclusions: study of the history of geologic evolution of the local structures Aran-deniz-Dashli and Sabail showed that their development is syndepositional by nature; study of paleogeographic environments and deposition rates of individual stratigraphic units identified the presence of favorable paleogeographic conditions for accumulation of organic matter in source rocks of the section above the Clarke number; complication of local structures by mud volcanoes as well as analysis of geothermal data throughout the section allow making the conclusion on existence of quite favorable pressure and temperature environment for oil and gas generation in potential source rocks.

### Key words:

Basin, structure, opportunities, lithology, hydrocarbon, rock, depression, fault, suite, oilfield.

### REFERENCES

1. Rakhmanov I.P. *Gryazevyje vulkany i ikh znachenie v prognozirovanii neftegazonosnosti nedr* [Mud volcanoes and their importance in predicting oil and gas content of the subsoil]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 271 p.
2. Babaev D.K., Gadzhiev A.N. *Glubinnoe stroenie i perspektivy neftegazonosnosti basseyna Kaspiyskogo morya* [Depth structure and oil-and-gas bearing prospects of the Caspian Sea basin]. Baku, NAFTA Press, 2006. 305 p.
3. Abdulgasanov L.D., Mamedova S.R., Allahverdiev E.G. *Otchet po ploschchadym Sangachal-deniz-Duvanni-deniz-Khare-Zirya v Bakinskom arhipelage po dvukhmernym (2D) seysmorazvedochnym rabotam* [Report on Sangachal-deniz-Duvanny-deniz-Khare-Zyrya in Baku archipelago on two-dimensional (2D) seismic survey]. Baku, Keshfiyatgeofizika OP, 2018. 147 p.
4. Gahramanov G.N. Formation of the oil and gas reservoirs in deep water areas of the South Caspian Depression. *Earth Sciences Research Journal*, 2017, vol. 21, no. 4, pp. 169–174. Available at: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/esrj/article/view/64008> (accessed 28 January 2019).
5. Isgandarov M.M. Some Results of Modeling Electrical Resistivity (on the Example of Deposits of the South-Absheeron Aquatorium Zone and the Northern Part of the Baku Archipelago). *SOCAR PROCEEDINGS*, 2017, Iss. 2, pp. 4–12. Available at: <http://proceedings.socar.az/az/journal/49> (accessed 28 January 2019).
6. Aliyev Ad. Mud volcanism of the South Caspian oil-and-gas bearing basin. *Geology and mineral resources of World Ocean*, 2006, no. 3, pp. 12–21. In Rus.
7. Mukhtarova K.Z., Nasibova G.J., Ahmadov M.G. The role of South-Eastern Gobustan and Absheeron depression clays with rheologically active properties in formation of structures and mud volcanism. *American Collocational Researcher Association, Washington Educational Researcher*, 2016, December, no. 9, pp. 673–678.
8. Bagir-zade F.M., Kerimov K.M., Salaev S.G. *Glubinnoe stroenie i neftegazonosnost Yuzhno-Kaspiyskoy megaupadiny* [Deep structure and oil-and-gas bearing of the South Caspian megadepression]. Baku, Az. Gos. Izdat. Publ., 1987. 302 p.
9. Kaqramanov K.N., Mukhtarova K.Z. Factors affecting the formation of reservoirs of large dimensions and the conditions for preservation of oil and gas deposits at great depths of the South Caspian depression. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2016, no. 3, pp. 25–33. In Rus.
10. Buniat-zade Z.A., Salayev N.S. Geological and tectonic conditions of formation of oil and gas accumulation at the fault zone in the South Caspian. *Azerbaijan Geologist*, 2000, no. 4, pp. 64–72. In Rus.
11. Vysotskiy I.V., Vysotskiy V.I. *Formirovanie neftyanykh, gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy* [Formation of oil, gas and gas condensate fields]. Moscow, Nedra Publ., 1986. 228 p.
12. Narimanov N.R., Kuliyeu K.Q. Studying the history of development of local uplifts of the Baku archipelago by an analytical method. *Azerbaijan National Academy of Sciences Transactions. Earth Sciences*, 2003, no. 1, pp. 18–24. In Rus.
13. Kerimov V.Y., Mukhtarova K.Z., Mustayev R.N. Disjunctive dislocations and their effect in formation and destruction of oil and

- gas accumulations in the South Caspian. *Oil, Gas and Business*, 2011, no. 6, pp. 18–26. In Rus.
14. Narimanov N.R. Geodynamic aspects of the formation of the sedimentary cover of the South Caspian depression. *Oil and gas geology*, 2003, no. 6, pp. 7–11. In Rus.
  15. Narimanov N.R., Babayev N.A., Gahramanov G.N., Javad-Zadeh Z. Cenozoic stage of development of local structures of the Lower Kura Depression and Baku Archipelago related to their oil and gas prospectivity. *Geological Journal*, 2018, vol. 53, no. 1, pp. 1–12. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/gj.3304> (accessed 28 January 2019). 2018,
  16. Narimanov N.R. The influence of geodynamic processes on oil and gas formation in the South Caspian depression. *Azerbaijan Oil Industry*, 2008, no. 8, pp. 13–18. In Rus.
  17. Mamedov P.Z., Babaev D.Kh. South Caspian Megatrough Seismostratigraphy. *AAPG International Conference*. Nice, France, 1995. pp. 527–539.
  18. Sokolov B.A. *Evolutsionno-dinamicheskie kriterii otsenki neftegazonosnosti nedr* [Evolutionary-dynamic criteria for assessing the oil and gas bearing of the subsoil]. Moskva, Nedra Publ., 1985. 247 p.
  19. Abdullayev E., Leroy S.A.G. Provenance of clay minerals in the sediments from the Pliocene Productive Series, western South Caspian Basin. *Marine and petroleum geology*, 2016, vol. 73, pp. 517–527.
  20. Vassoyevich N.B., Bazhenova O.K., Burlin Y.K. Oil potential of sedimentary formations. *Outcomes of Science and Technology*, 1982, no. 11, pp. 37–43. In Rus.
  21. Selley R.C. *Elements of petroleum geology*. 2<sup>nd</sup> ed. London, United Kingdom, Academicpress, 1998. 479 p.
  22. Gamkrelidze I.P. Mobilizm i problemy tektoniki Kavkaza [Mobilism and the problems of the tectonics of the Caucasus]. *Problemi geodinamiki Kavkaza* [Issues of Caucasus Geodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. pp. 4–8.
  23. Alizadeh A.A., Guliev I.S., Kadirov F.A., Epelbaum L.V. Geosciences of Azerbaijan. *Geology*, 2016, vol. I, 340 p.
  24. Alizadeh A.A., Guliyev I.S., Kadirov F.A., Epelbaum L.V. Geosciences of Azerbaijan. *Economic Geology and Applied Geophysics*, 2017, vol. I, 340 p. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264817216300599?via%3Dihub> (accessed 28 January 2019).

Received: 1 February 2019.

#### Information about the authors

**Nariman R. Narimanov**, Cand. Sc., associate professor, Azerbaijan State Oil and Industry University.

**Khuraman Z. Mukhtarova**, Cand. Sc., associate professor, Azerbaijan State Oil and Industry University.

**Gulter J. Nasibova**, Cand. Sc., associate professor, Azerbaijan State Oil and Industry University.

УДК 628.58

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ВЫБРОСОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА БАЗЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «СКАТ»

Антонова Александра Михайловна<sup>1</sup>,  
anton@tpu.ru

Воробьев Александр Владимирович<sup>1</sup>,  
worob@tpu.ru

Воробьев Владимир Александрович<sup>1</sup>,  
worob@tpu.ru

Дутова Екатерина Матвеевна<sup>1</sup>,  
dutova@tpu.ru

Покровский Виталий Дмитриевич<sup>2</sup>,  
vdp@mail.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

**Актуальность** рассматриваемой тематики заключается в необходимости повышения точности прогнозирования содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе от выбросов объектов энергетики, в том числе атомных станций, при проведении независимой оценки.

**Цель работы:** обоснование выбора методики расчета рассеивания газообразных загрязняющих веществ от непрерывно действующих высоких источников с учетом метеорологических факторов и тестирование опыта эксплуатации программного комплекса.

**Объекты:** современные методы расчетов рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, рекомендуемые для использования на территории России и методика Пасквилла для расчетов загрязнения от непрерывно действующего высокого источника при различных стационарных метеорологических условиях.

**Методы:** математическое моделирование и расчетный анализ на основе разрабатываемого компьютерного программного комплекса «СКАТ».

**Результаты.** Проведен анализ методов по рассеиванию газообразных загрязняющих веществ в атмосфере: MPP-2017 и Пасквилла. Сделан вывод о том, что для расчетов рассеивания газообразных загрязняющих веществ выброса объектов энергетики для различных категорий состояния атмосферы в условиях постоянства метеорологических факторов предпочтительнее использовать методику Пасквилла, основанную на модели Гаусса. Разработанный программный комплекс «СКАТ» может быть использован для прогнозирования приземных концентраций загрязняющих веществ и расчетов рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе при решении задач мониторинга выбросов загрязняющих веществ в условиях действующих объектов. Применительно к условиям г. Северска Томской области для проектируемого энергоблока с реактором БРЕСТ-300 и реакторным ядерным топливным циклом по модели Гаусса проведены расчеты распределения выбросов радионуклидов в приземном слое атмосферы.

### Ключевые слова:

Загрязняющие вещества, моделирование, рассеивание, атмосферный воздух, турбулентная диффузия, защита окружающей среды.

### Введение

Процессы переноса загрязняющих веществ (ЗВ) от объектов энергетики и промышленности являются существенным фактором, влияющим на социальную обстановку и экономическое состояние регионов мира [1]. Необходимость повышения точности прогнозирования содержания ЗВ в атмосфере определяет актуальность этих исследований [2, 3].

Выбросы ЗВ из труб объектов энергетики при поступлении в атмосферу включаются в многообразные процессы движения атмосферного воздуха, осаждаются на почву, распространяются в гидросфере, загрязняя поверхностные и подземные воды. Исследования закономерностей сложных процес-

сов переноса загрязняющих веществ и прогнозирования содержания ЗВ в объектах биосферы в нашей стране [4–8] и за рубежом [9–11] ведутся со второй половины XX в.

Для тепловых электростанций (ТЭС) характерно поступление через дымовую трубу в атмосферу химических загрязнителей в виде газов и аэрозолей, образующихся при сжигании органического топлива. Основные из них – оксиды С, Н, О, N, S и микроэлементы (мышьяк, кадмий, никель, кобальт, медь, свинец, ртуть), содержащиеся в угле, значительная часть которых не улавливается фильтрами. Атомные станции (АС) выбрасывают в атмосферу через вентиляционную трубу газоаэро-

зольную среду, большую часть активности которой составляют радиоактивные благородные газы (РБГ), такие как Ar, Xe, Kr. Кроме того, в состав выброса входят активационные газы ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{16}\text{N}$ ), радионуклиды йода и долгоживущие нуклиды в аэрозольной форме (Co, Cs) [12, 13]; все составляющие выброса АС строго нормированы.

Соблюдение установленных норм содержания ЗВ в приземном слое атмосферы требует прогнозирования на основе математических моделей с использованием метеорологических данных, адекватно отражающих рассеивание, и последующего контроля содержания ЗВ в атмосферном воздухе. Разработано множество моделей разной степени сложности [14–17], как правило, на практике их использование сопряжено с большими трудностями.

Для высоких источников, каковыми являются дымовые трубы ТЭС и вентиляционные трубы АС, ключевыми функциями рассеивания являются: распределение приземных концентраций ЗВ в направлении оси струи выброса, значения максимальной концентрации, расстояния от источника, на котором они достигаются и опасной скорости ветра. Для одного и того же источника эти функции определяются типом устойчивости атмосферы и скоростью ветра.

#### Теоретические основы рассеивания примесей в атмосфере

Газоаэрозольный выброс объектов энергетики имеет теплогидравлический подъем над устьем трубы, потому как температура выброса всегда выше температуры окружающего воздуха. Поэтому взаимодействие выброса с атмосферным воздухом начинается выше устья трубы на высоте  $H_{\text{эфф}}$ .

Выброс из точки ( $H_{\text{эфф}}$ ,  $x$ ), постепенно удаляясь от трубы, рассеивается вследствие динамической турбулентности, вызванной ветром. При касании факела земли в приземном слое атмосферы появляются составляющие выброса – газы или аэрозоли.

Для решения задачи о распространении газоаэрозольных выбросов надо учитывать строение атмосферы и законы движения воздуха в ней. При этом наибольший интерес представляет ближайший к поверхности земли слой атмосферы – тропосфера. Движение воздуха во всем объеме тропосферы является турбулентным, что приводит к быстрому рассеиванию, при этом главную роль играют градиент ветра и температуры, как в пространстве, так и во времени. Происходит диффузия на фоне основного осредненного движения [18].

Функциональное описание рассеяния радионуклидов в атмосфере предполагает их турбулентное движение в одной плоскости и диффузионное в двух других плоскостях, имеет вид [19]

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} + u \frac{\partial a}{\partial x} + v_g \frac{\partial a}{\partial z} = K \nabla^2 a - \lambda a,$$

здесь

$$K \nabla^2 a = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial a}{\partial z},$$

где  $a$  – содержание радионуклида;  $x, y, z$  – координаты движущейся частицы;  $u$  – скорость ветра;  $v_g$  – скорость гравитационного осаждения;  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада;  $K$  – коэффициент турбулентности;  $K_x, K_y, K_z$  – коэффициенты турбулентной диффузии, характеризующие интенсивность турбулентного обмена;

$$K_x = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_x^2}{d\tau}; K_y = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_y^2}{d\tau}; K_z = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_z^2}{d\tau}.$$

Здесь  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – квадратичные дисперсии координат движущейся частицы:

$$\sigma_x^2(\tau) = [x(\tau) - x(0)]^2; \sigma_y^2(\tau) = [y(\tau) - y(0)]^2;$$

$$\sigma_z^2(\tau) = [z(\tau) - z(0)]^2.$$

В уравнение турбулентной диффузии входит слагаемое, содержащее скорость ветра, это принципиально отличает его от уравнения фиковской диффузии и существенно усложняет решение дифференциального уравнения. Коэффициенты турбулентной диффузии имеют значения, в десятки и сотни тысяч раз превышающие значения коэффициентов молекулярной диффузии, они различны в разных направлениях и меняются вдоль каждой координаты (особенно вдоль вертикальной  $Z$ ).

Для решения задачи рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере с помощью уравнения турбулентной диффузии необходимо знать значения составляющих вектора скорости ветра в зависимости от времени. Поэтому использование этого уравнения дает лишь приближенное решение с высокой степенью погрешности. Кроме того, необходим учет типа подстилающей поверхности (ее шероховатости) [20], вымывающей способности осадков и других факторов.

#### Анализ методик расчета рассеивания примесей в атмосфере

В отечественной практике в настоящее время используются в основном две методики, рекомендуемые для расчета загрязнения атмосферного воздуха загрязняющими веществами промышленного происхождения. Это современные методы расчетов рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, рекомендуемые для использования на территории России (далее – МРР-2017), и методика, разработанная Ф. Пасквиллом (так называемая Гауссова модель). Всемирная метеорологическая организация предложила использовать указанную методику для расчетов загрязнения атмосферного воздуха от выбросов энергетических и промышленных предприятий.

В основе методики МРР-2017 [3] лежат предположения о влиянии на характер и масштабы рассеивания загрязняющих веществ в приземной части атмосферы как метеорологических параметров (стратификация атмосферы, скорость и направление ветра, температура воздуха), так и параметров источника выброса и состава газоаэрозольной смеси.

Восстановление пространственного распределения концентрации загрязняющих веществ базируется на расчете следующих основных параметров:

$u_m$  – опасной скорости ветра;  $x_m$  – расстояния от источника выброса до точки с максимальной приземной концентрацией;  $C_m$  – максимального значения приземной концентрации.

Для одиночного точечного источника с круглым устьем максимальная величина приземной разовой концентрации ЗВ от выброса пылегазовоздушной смеси вычисляется по уравнению

$$C_m = \frac{AMFmn\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}},$$

где  $C_m$  – в  $\text{мг/м}^3$  ( $\text{мБк/м}^3$ );  $A$  – коэффициент, определяемый типом стратификации атмосферы;  $M$ ,  $V_1$  – активность ЗВ, выбрасываемых в атмосферу в единицу времени,  $\text{г/с}$  ( $\text{Бк/с}$ ) и объемный расход газозаэрозолей,  $\text{м}^3$ ;  $F$ ,  $m$ ,  $n$  – безразмерные коэффициенты, зависящие от скорости оседания ЗВ в атмосферном воздухе и от условий выхода газозаэрозольной смеси из вентиляционной трубы;  $\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий рельеф местности;  $H$  – высота источника выброса над уровнем земли,  $\text{м}$ ;  $\Delta T = T_r - T_b$  – перепад между температурой выбрасываемой газозаэрозольной смеси  $T_r$  и температурой атмосферного воздуха  $T_b$ ,  $^\circ\text{C}$ .

Расстояние от источника выброса до точки с максимальной приземной концентрацией ЗВ рассчитывается по формуле

$$x_m = \frac{5 - F}{4} dH,$$

где  $d$  – безразмерный коэффициент.

Алгоритм определения опасной скорости ветра  $u_m$  довольно громоздкий и в данной работе не приводится.

Методика МРР-2017 рекомендована в настоящее время для проведения расчетов рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе с целью нормирования и установления ПДВ (предельно допустимых выбросов). Одним из недостатков данной методики считается ограниченность рекомендаций для вычисления рассеяния загрязняющих веществ при задании конкретных метеорологических условий в случае кратковременно действующего источника. Данную методику затруднительно применять для прогнозных расчетов при конкретных метеорологических условиях и специфических источниках выбросов. Кроме этого, методика МРР-2017 не позволяет в полной мере учесть тип подстилающей поверхности.

Методика Пасквилла [2, 21] основана на Гауссовой модели рассеивания. При истечении загрязняющих веществ в атмосферу образуется облако, которое сносится вместе с окружающим атмосферным воздухом по направлению ветра. В процессе движения происходит турбулентное перемешивание с окружающим атмосферным воздухом, что приводит к расширению облака в пространстве и изменению концентрации ЗВ в нем. В итоге формируется пространственное распределение концентрации загрязняющих веществ, которое в са-

мом общем случае описывается нормальным (Гауссовым) законом.

В соответствии с этой методикой, при неизменных метеорологических условиях диффузия примеси от непрерывного источника приводит к приземной концентрации ЗВ, которую можно найти с помощью выражения:

$$C(x) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left[ - \left( \frac{H_{\text{эфф}}^2}{2 \sigma_z^2} \right) \right] f_f f_w,$$

где  $C(x)$  – концентрация (объемная активность),  $\text{Бк/м}^3$ ;  $Q$  – мощность источника,  $\text{Бк/с}$ ;  $H_{\text{эфф}}$  – эффективная высота выброса,  $\text{м}$ ;  $u$  – скорость ветра на эффективной высоте выброса,  $\text{м/с}$ ;  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  – коэффициенты дисперсии распределения Гаусса (турбулентной диффузии) в направлениях, перпендикулярных к направлению ветра,  $\text{м}$ ;  $f_f$  – эмпирический фактор обеднения, учитывающий сухое осаждение;  $f_w$  – эмпирический фактор обеднения, учитывающий вымывание осадками.

Для расчёта коэффициентов вертикальной  $\sigma_z$  и горизонтальной  $\sigma_y$  турбулентной диффузии используются эмпирические формулы Смита–Хоскера [19], считающиеся в настоящее время достаточно надежными. Указанные коэффициенты включают в себя факторы, зависящие от состояния устойчивости атмосферы и типа подстилающей поверхности.

К основным достоинствам модели Гаусса относится возможность учесть влияние на распределение загрязняющего вещества таких важных факторов, как:

- состояние устойчивости атмосферы;
- тип (шероховатость) подстилающей поверхности;
- тепловой подъем струи вследствие перегрева выбрасываемой газозаэрозольной смеси;
- выпадение примесей на поверхность земли;
- вымывающая способность осадков и др.

К недостаткам Гауссовой модели можно отнести ограничения использования по скорости ветра (модель нельзя использовать при  $u < 1$   $\text{м/с}$ ) и расстояниям от источника (модель работает до 10  $\text{км}$ ).

Гауссова модель рассеивания примеси лежит в основе методик МАГАТЭ, которые включают рекомендации для вычисления дисперсий по исходным параметрам состояния атмосферы. Эти разработки, основанные на результатах экспериментальных исследований Ф. Пасквилла и Ф. Гиффорда, используются для широкого спектра расчетов зарубежными коллегами.

#### Моделирование поля концентраций загрязняющих веществ от выбросов энергообъектов

Цель исследования – установить вид распределения в приземном слое атмосферы концентраций ЗВ газозаэрозольного выброса энергообъектов (тепловой или атомной станции). Исследованию подлежит поведение выброса в атмосферном воздухе при различных сочетаниях влияющих факторов –

скорости ветра, категории атмосферы по Пасквиллу, вида осадков, значения температуры выброса. Ставятся задачи:

- определения значений приземной концентрации основных ЗВ выброса в зависимости от расстояния от точки выброса;
- определения влияния различных факторов на поведение факела выброса в атмосферном воздухе;
- построения графических зависимостей концентрации радионуклидов от расстояния от источника выброса.

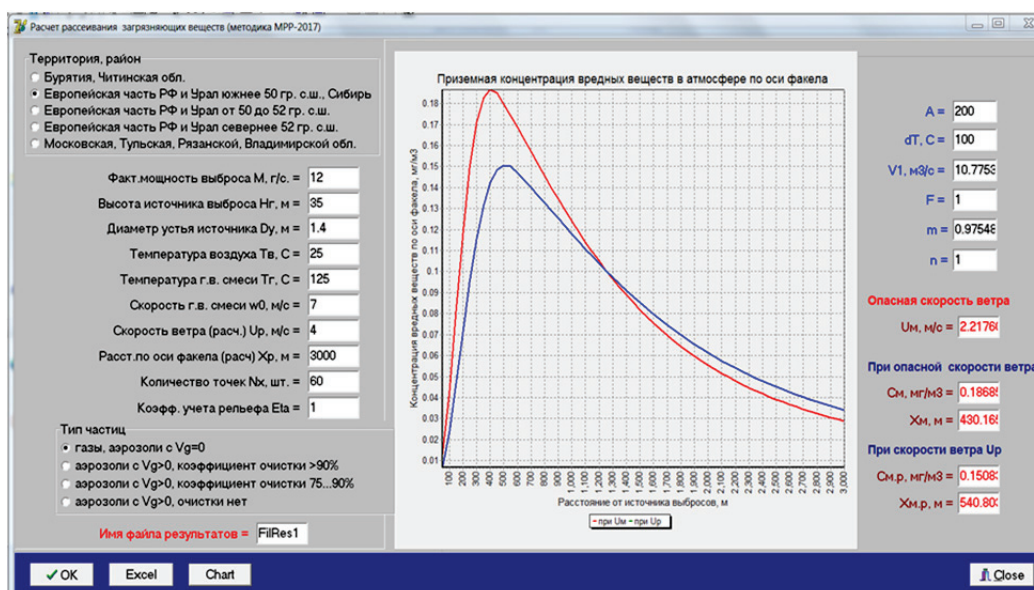
Для решения задач использованы методики расчета концентраций MPP-2017 и Пасквилла.

Принято, что скорость ветра меняется по высоте и направлению, поскольку, по мере удаления от

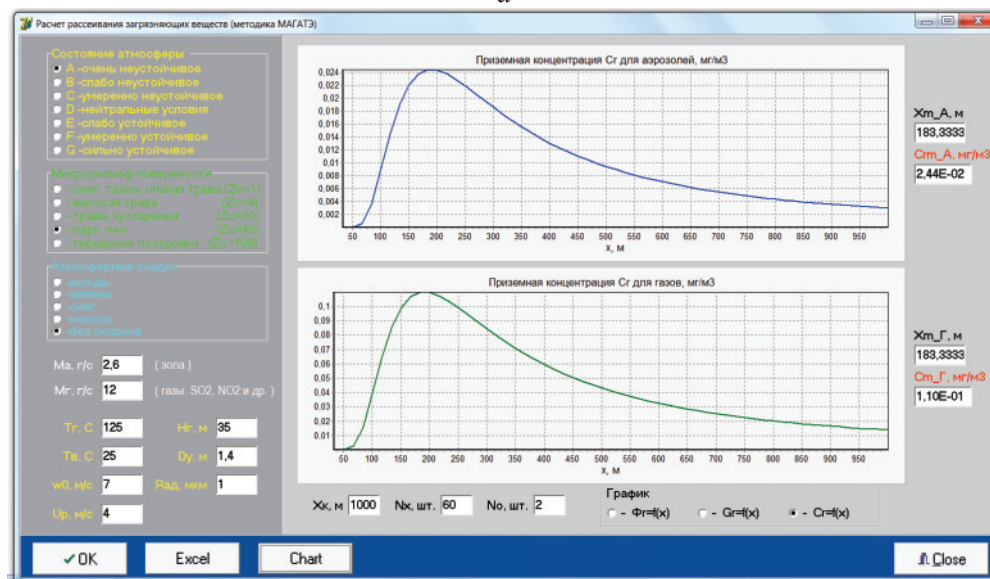
источника, увеличивается вероятность изменения направления ветра. Учтено влияние рельефа местности, высоких препятствий, водоемов на распространение загрязняющих веществ. С помощью факторов истощения учтены такие явления, как снижение активности вследствие естественного распада, вымывание газовой примеси в подоблачном слое, химические реакции между примесью и атмосферным воздухом.

При моделировании приняты следующие допущения.

1. Дисперсия концентрации радионуклидов в направлении, поперечном к оси факела, рассчитывается по упрощенной формуле.
2. Приняты среднегодовые значения скорости ветра.



а



б

Рис. 1. Скриншот главного окна исполняемого модуля «Scat\_MRR» (а) и главного окна исполняемого модуля «Scat\_PSC» (б)

Fig. 1. Screenshot of the main window of the Scat\_OND executable (а) and the main window of the Scat\_PSC executable (б)

3. Не учитываются фоновые значения концентраций загрязняющих веществ.

Несмотря на перечисленные выше упрощения, с помощью разработанной модели оказалось возможным произвести достоверную количественную оценку поля концентрации от выброса загрязняющих веществ.

#### Описание программного комплекса

Для реализации алгоритмов расчета рассеивания ЗВ в соответствии с рассмотренными выше методиками создан программный комплекс «SKAT».

Комплекс, разработанный в лицензионной системе программирования Borland Turbo Delphi 7, представляет собой приложение, функционирующее в операционной среде MS Windows и совместимых с ними ПЭВМ. Текущая версия программного комплекса «SKAT» включает 2 специализированных исполняемых модуля: «Scat\_PSC» и «Scat\_MRR».

В исполняемых модулях комплекса имеется возможность графической интерпретации результатов расчета и импорта последних в MS Excel. Скриншоты главных окон исполняемых модулей программного комплекса «SKAT» представлены на рис. 1.

#### Результаты расчетов

С помощью разработанного программного комплекса «SCAT» были выполнены сравнительные расчеты рассеивания газообразных загрязняющих веществ по двум методикам: Пасквила [2, 21] и MPP-2017 [3]. В качестве исследуемого объекта рассматривались непрерывно действующий источник выброса дымовых газов ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ).

В расчетах приняты следующие значения входных данных:

- мощность источника выброса по газам ( $M_r$ ) и по аэрозолям ( $M_a$ ) равна 12 и 2,6 г/с, соответственно;
- скорость газоаэрозольной смеси в устье источника выброса ( $w_0$ ) равна 7 м/с;
- высота выброса смеси ( $H$ ) равна 35 м;
- диаметр устьевой части источника ( $D_y$ ) равен 1,4 м;
- диапазон изменения температур окружающего воздуха и выбрасываемой смеси ( $\Delta T$ ) равен 100 °С;
- скорость ветра на высоте выброса опасная (в 2,1 и 2,25 м/с).

Перечисленные выше параметры соответствуют известному из [1] тестовому расчету.

Результаты расчетов по сравниваемым методикам представлены на рис. 2–4.

Анализ содержимого рис. 2 показывает, что обе указанные выше методики дают близкие оценки значений опасной скорости ветра, в 2,1 и 2,25 м/с по методике MPP-2017 и Пасквила, соответственно, при которой возможно формирование максимального содержания загрязняющих веществ.

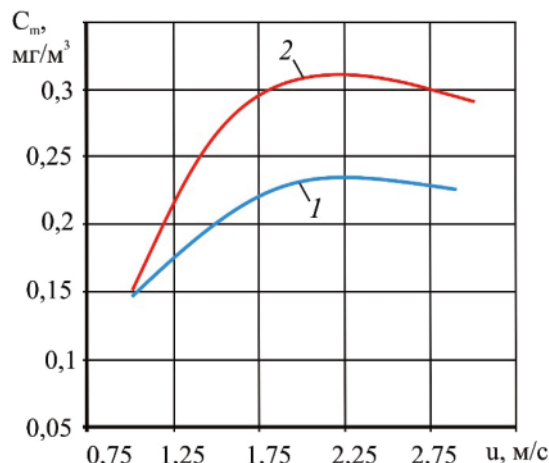


Рис. 2. Влияние скорости ветра на характер изменения максимальной концентрации  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  по оси факела в случае неблагоприятных метеорологических условий. Расчет по методике: 1 – MPP-2017; 2 – Пасквила

Fig. 2. Change in the maximum concentration along the axis of the torch depending on the wind speed in case of adverse meteorological conditions. Calculation according to the: 1 – MPP-2017 method; 2 – Pasquill method

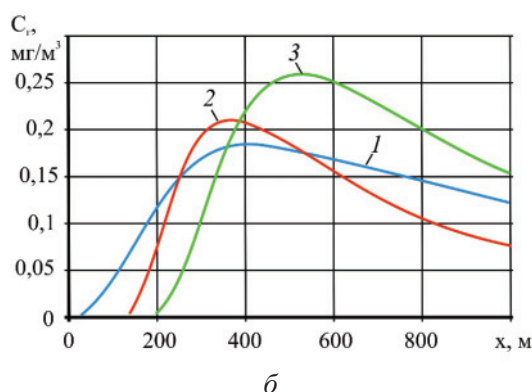
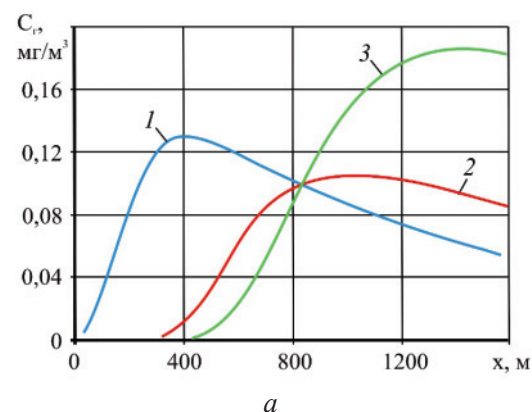


Рис. 3. Распределение приземной концентрации  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  вдоль оси факела при опасной скорости ветра, соответствующее благоприятным (а) и неблагоприятным (б) метеорологическим условиям: 2 и 3 – расчет по методике Пасквила ( $z_0=10$  и 1 см); 1 – расчет по методике MPP-2017

Fig. 3. Distribution of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  surface concentration along the axis of the torch at dangerous wind speed, corresponding to favorable (a) and unfavorable (b) meteorological conditions: 2 and 3 – calculation using the Pasquill method ( $z_0=10$  and 1 cm); 1 – calculation according to the MPP-2017 method

При благоприятных метеорологических условиях (рис. 3, а) результаты моделирования распределения концентрации газообразных загрязняющих веществ по оси факела выброса существенным образом зависят от выбранной методики расчетов (МРР-2017 или Пасквилла). Причем положение точки с максимальным значением приземной концентрации, найденное по формулам МРР-2017, практически не зависит от метеорологических параметров, что противоречит здравому смыслу и данным [10, 15].

Напротив, при неблагоприятных метеорологических условиях (рис. 3, б) распределение концентрации ЗВ мало зависит от использованной методики расчета, в первую очередь это касается расположения точки с максимальным значением приземной концентрации ЗВ.

Анализ кривых на рис. 3, рассчитанных с использованием методики Пасквилла, позволяет сделать вывод о существенной зависимости положения максимума приземной концентрации от шероховатости подстилающей поверхности: изменение шероховатости подстилающей поверхности с 1 до 100 см приводит к смещению расположения точки с максимальной концентрацией с 1400 до 660 м. Менее заметно влияние шероховатости на величину самого максимума. В методике МРР-2017 учесть тип подстилающей поверхности затруднительно.

На рис. 4 приведены результаты расчета максимальных приземных концентраций  $C_m$  газообразных ЗВ и расстояний  $x_m$  от источника выброса, где при различных метеорологических условиях эти значения концентраций достигаются.

По модели Гаусса проведены вариантные расчеты распределения концентраций радионуклидов выброса в приземном слое атмосферы для условий г. Северска Томской области для проектируемого энергоблока АС с реактором БРЕСТ-300 с реакторным ядерным топливным циклом.

В этом исследовании выполнен комплекс расчетов содержаний РБГ, радионуклидов йода и аэрозолей в приземном слое атмосферы при нормальной работе АС в зависимости от скорости ветра для разных категорий устойчивости атмосферы (А, Е, F), результаты расчетов приведены на рис. 5–11.

Найдено распределение по оси факела в приземном слое атмосферы отдельных составляющих выброса АЭС – концентраций РБГ, радионуклидов йода и аэрозолей. Определены соответствующие максимальные значения концентрации в приземном слое атмосферы отдельных составляющих выбросов, расстояние от устья трубы, на котором они достигаются. Определено также значение опасной скорости ветра и распределение концентраций РБГ, радионуклидов йода и аэрозолей в приземном слое атмосферы при этой скорости.

Расчеты проведены для следующих условий. Шероховатость подстилающей поверхности ( $z_0$ ) принята равной 40 см, температура выброса газоаэрозолей ( $t_0$ ) – равной 15 °С, скорость выхода га-

зов из устья вентиляционной трубы ( $w_0$ ) – равной 10 м/с. Температура окружающего атмосферного воздуха ( $t$ ) была принята в зависимости от категории состояния атмосферы в диапазоне от –20 до +20 °С.

Изображенные на рис. 5, 6 зависимости показывают, что фактором, наиболее влияющим на концентрацию в приземном слое атмосферы отдельных составляющих выброса атомной станции (РБГ, радионуклидов йода и аэрозолей), является категория состояния атмосферы (предельно неустойчивая А, умеренно устойчивая F, слабо устойчивая Е). Максимальное значение концентрации радионуклидов йода для категории Е при скорости ветра 2 м/с составляет  $3 \cdot 10^{-4}$  Бк/м<sup>3</sup> (рис. 6, а), что приблизительно в три раза меньше, чем при тех же условиях для категории состояния атмосферы А (рис. 5, а). Расстояние, на котором достигается максимум концентраций, также сильно зависит от категории: для А – 1 км, для Е – 4 км.

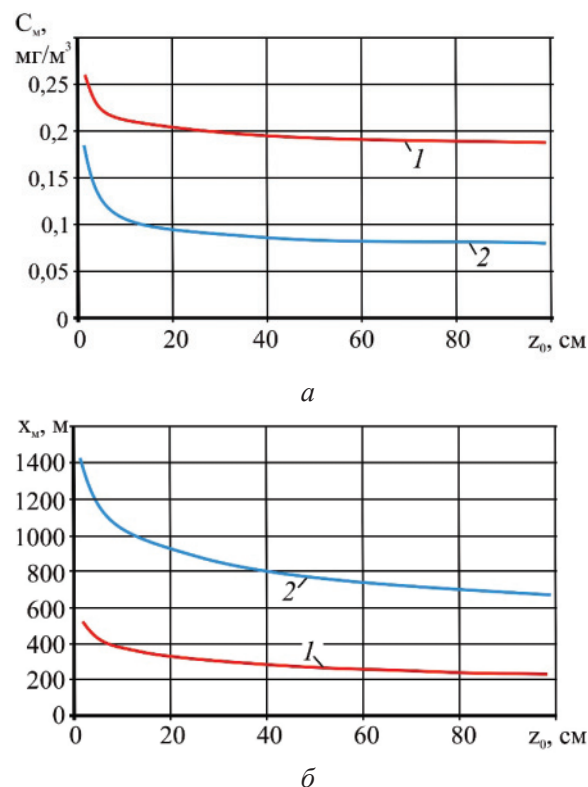


Рис. 4. Зависимость значений концентрации SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> (а) и расстояния от источника (б) от шероховатости ( $z_0$ ) подстилающей поверхности при метеорологических условиях: 1 – неблагоприятных; 2 – благоприятных

Fig. 4. Dependence of SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> concentration values (а) and the distance from the source (б) on the roughness ( $z_0$ ) of the underlying surface under meteorological conditions: 1 – adverse; 2 – favorable

Скорость ветра наибольшее влияние оказывает на значение концентрации радионуклидов при категории Е состояния атмосферы. В диапазоне увеличения скорости ветра от 2 до 6 м/с максимальное значение концентрации падает в 2–3 раза (рис. 6). В то же время для категории А состояния

атмосферы в том же диапазоне скорости ветра концентрация загрязняющих веществ падает не более чем в 1,5 раза (рис. 5).

Очень существенно влияет значение скорости ветра на максимальную концентрацию йода при категории F, что видно из рис. 7, а. Максимальная концентрация йода падает более чем на порядок при росте скорости ветра от 0,2 до 5 м/с. Расстояние же, соответствующее максимальной концентрации, при этой категории существенно не меняется с изменением скорости ветра (рис. 7, б).

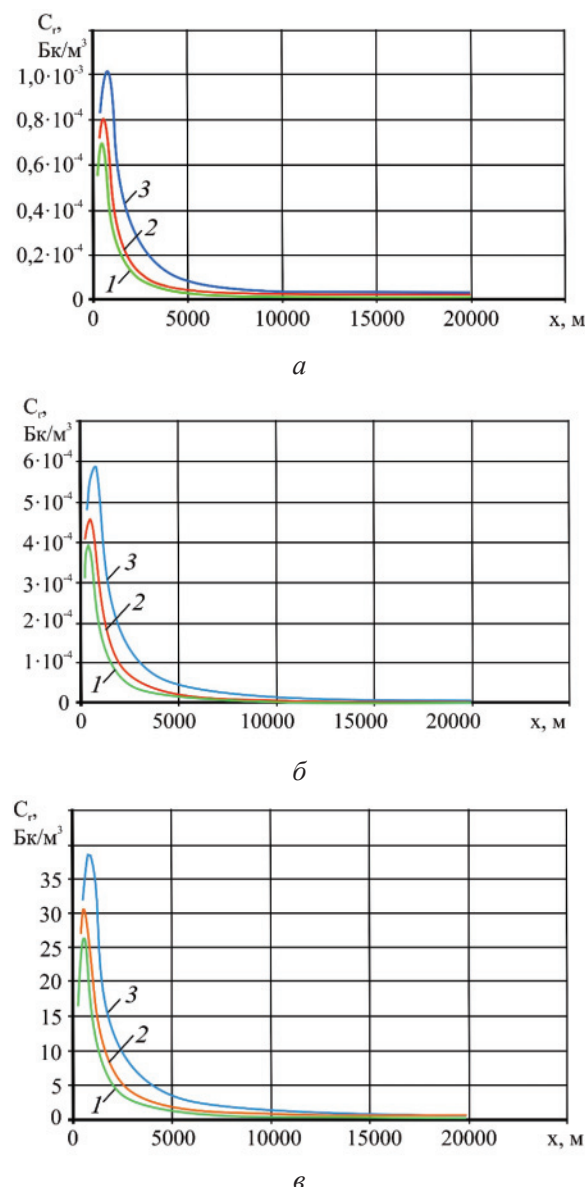


Рис. 5. Распределение концентрации йода (а), аэрозолей (б) и РБГ (в) в приземном слое (категория А,  $z_0=40$  см;  $t=+15^\circ\text{C}$ ;  $t_0=15^\circ\text{C}$ ;  $w_0=10$  м/с) при разных скоростях ветра  $u$ : 1) 6; 2) 4; 3) 2 м/с

Fig. 5. Distribution of iodine (a), aerosols (б) and RNG (в) concentrations in the surface layer (category A,  $z_0=40$  cm;  $t=+15^\circ\text{C}$ ;  $t_0=15^\circ\text{C}$ ;  $w_0=10$  m/s) at different wind speeds  $u$ : 1) 6; 2) 4; 3) 2 m/s

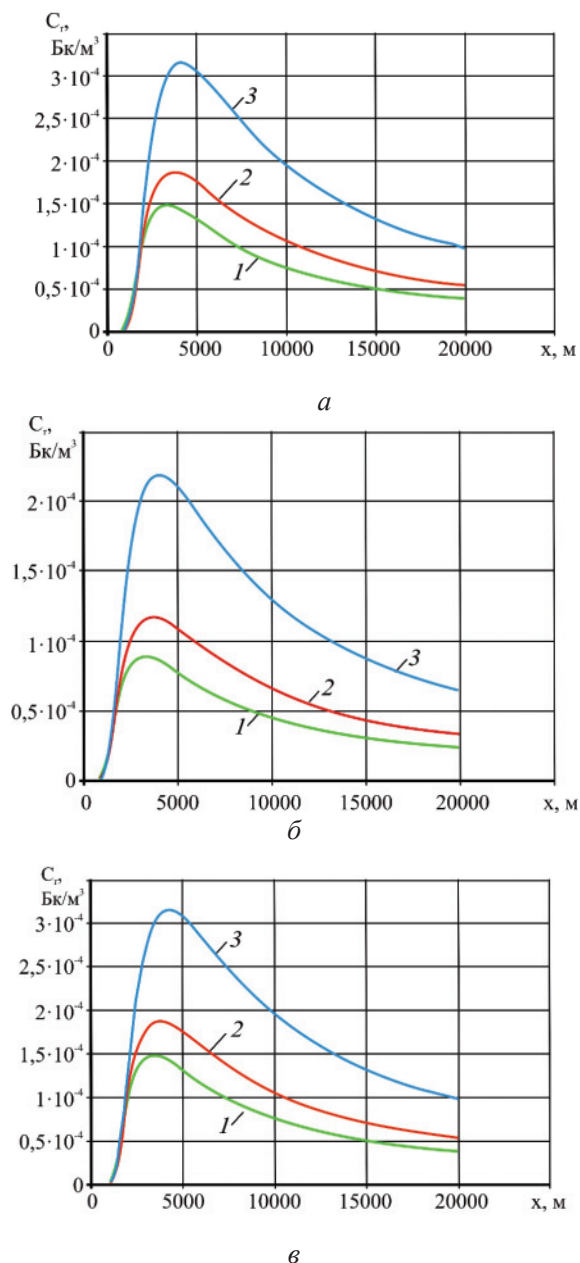


Рис. 6. Распределение концентрации йода (а), аэрозолей (б) и РБГ (в) в приземном слое (категория Е,  $z_0=40$  см;  $t=+20^\circ\text{C}$ ;  $t_0=15^\circ\text{C}$ ;  $w_0=10$  м/с) при разных скоростях ветра  $u$ : 1) 6; 2) 4; 3) 2 м/с

Fig. 6. Distribution of iodine (а), aerosols (б) and RNG (в) concentration in the surface layer (category E,  $z_0=40$  cm;  $t=+20^\circ\text{C}$ ;  $t_0=15^\circ\text{C}$ ;  $w_0=10$  m/s) at different wind speeds  $u$ : 1) 6; 2) 4; 3) 2 m/s

С использованием полученных данных для категории А при среднегодовом значении скорости ветра 4 м/с построены концентрационные профили РБГ (рис. 9) и йода (рис. 10) по направлению ветра, на которые нанесены изолинии концентраций. По этим рисункам можно сказать, что след достаточно узкий, его ширина не превышает 400 м в самом широком месте (на расстоянии 300 м от трубы). Анализ данных показывает, что за преде-

лами санитарно-защитной зоны (в радиусе 2–3 км от АЭС) концентрация радионуклидов становится пренебрежимо малой.

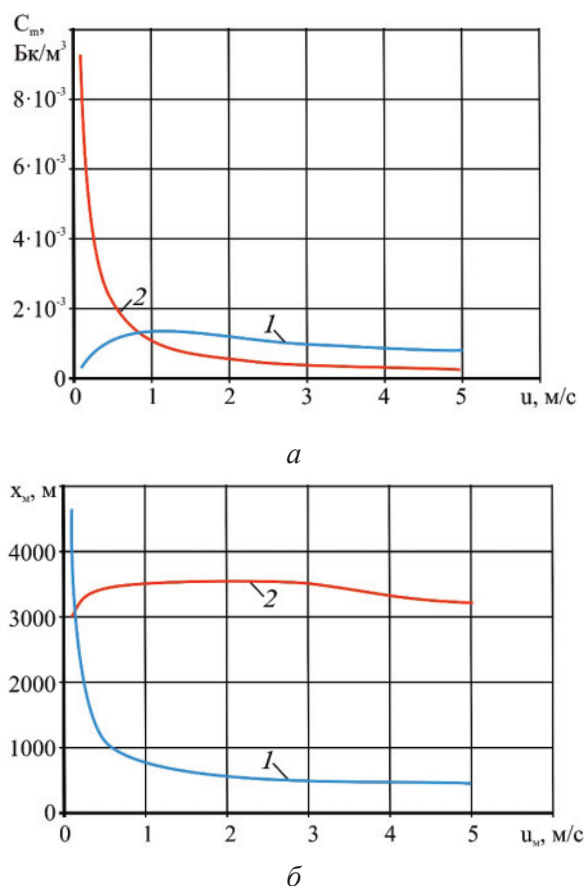


Рис. 7. Зависимость максимальной концентрации йода в приземном слое (а), и расстояния от источника (б), на котором достигается максимальная концентрация, от скорости ветра и при разных категориях состояния атмосферы  $z_0=40$  см;  $t=+20$  °C;  $t_0=15$  °C;  $w_0=10$  м/с: 1) категория А; 2) категория F

Fig. 7. Dependence of the maximum iodine concentration in the surface layer (a), and the distance from the source (b), where the maximum concentration is reached at different wind speeds  $u$  and atmospheric categories  $z_0=40$  cm;  $t=+20$  °C;  $t_0=15$  °C;  $w_0=10$  m/s: 1) category A; 2) category F

Сравнение значений концентраций в приземном слое атмосферы отдельных составляющих выброса АЭС с допустимыми концентрациями [12] показывает, что в рассмотренных условиях за пределами санитарно-защитной зоны концентрации РБГ, йода и аэрозолей заметно ниже допустимых значений. При этом надо иметь в виду, что исходные данные соответствовали нормальной работе АС и был сделан ряд допущений, в частности, принято отсутствие фона активности.

#### Выводы

С целью повышения точности прогнозирования поведения выброса от энергообъектов в атмосфере проведен анализ математических моделей переноса загрязняющих веществ, рассмотрены алгоритмы и

разработан программный комплекс для расчета рассеивания примесей в приземном слое атмосферы по двум методикам: МРР-2017 и Пасквилла.

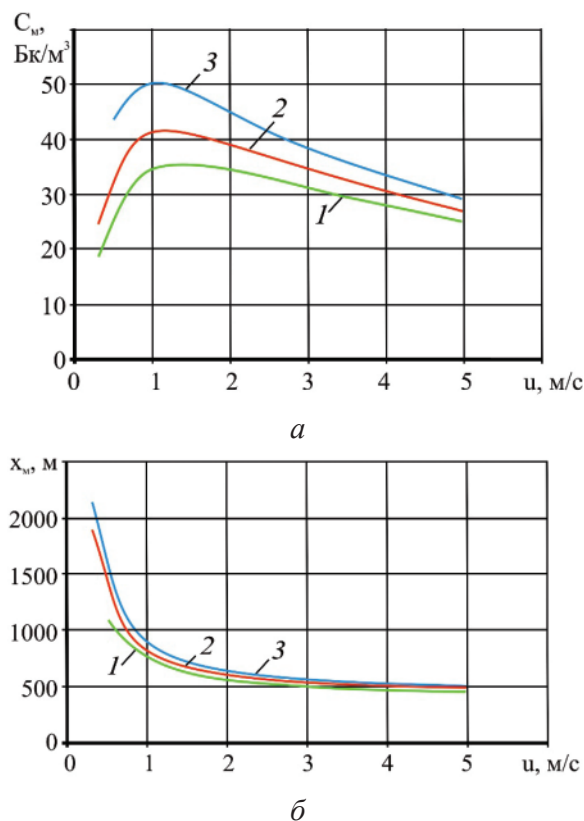


Рис. 8. Зависимость максимальной концентрации радиоактивных благородных газов в приземном слое (а) и расстояния от источника (б), соответствующего максимальной концентрации, от скорости ветра при разных значениях температуры атмосферного воздуха  $t_a$  (категория А;  $z_0=40$  см;  $t_0=15$  °C;  $w_0=10$  м/с): 1)  $t_a=-20$  °C; 2)  $t_a=0$  °C; 3)  $t_a=20$  °C

Fig. 8. Dependence of the maximum concentration of radioactive noble gases in the surface layer (a) and the distance from the source (b), corresponding to the maximum concentration, at different wind speeds and temperatures of atmospheric air  $t_a$  (category A;  $z_0=40$  cm;  $t_0=15$  °C;  $w_0=10$  m/s): 1)  $t_a=-20$  °C; 2)  $t_a=0$  °C; 3)  $t_a=20$  °C

Сравнение значений концентраций в приземном слое атмосферы отдельных составляющих выброса АЭС с допустимыми концентрациями [12] показывает, что в рассмотренных условиях за пределами санитарно-защитной зоны концентрации РБГ, йода и аэрозолей заметно ниже допустимых значений. При этом надо иметь в виду, что исходные данные соответствовали нормальной работе АС и был сделан ряд допущений, в частности, принято отсутствие фона активности.

#### Выводы

С целью повышения точности прогнозирования поведения выброса от энергообъектов в атмосфере проведен анализ математических моделей переноса загрязняющих веществ, рассмотрены алгоритмы и

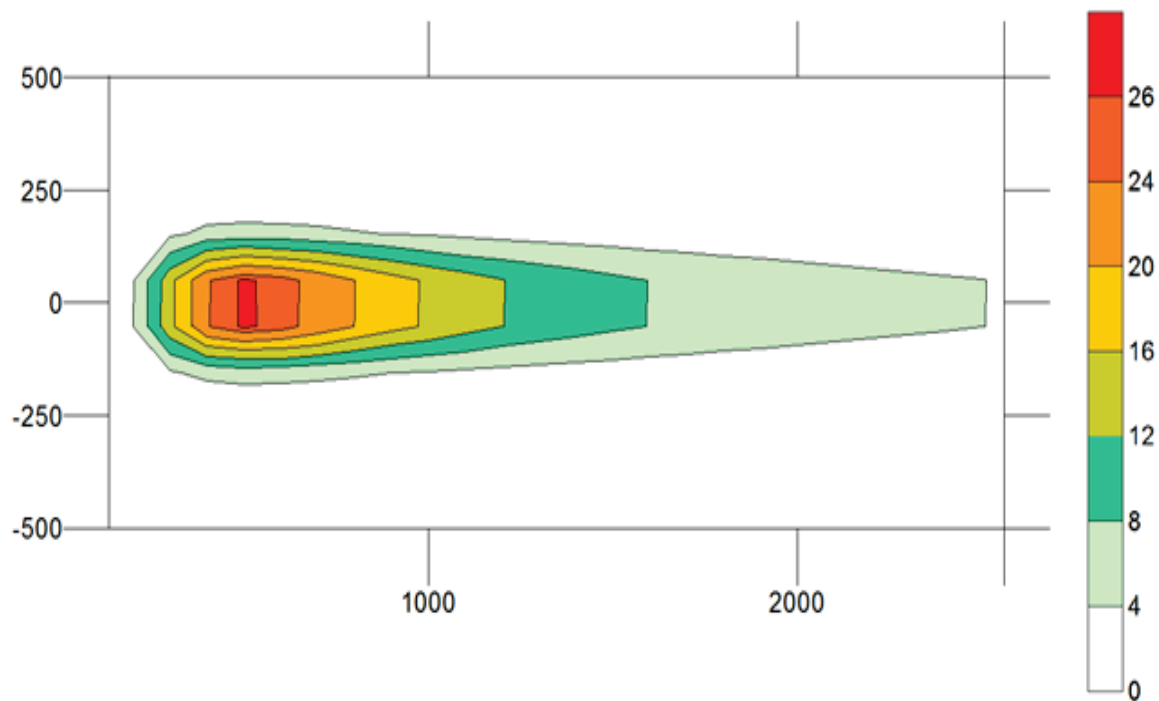


Рис. 9. Ширина поля концентраций РБГ ( $\text{Бк}/\text{м}^3$ ) в приземном слое по направлению ветра: категория А;  $z_0=40$  см;  $t=+20^\circ\text{C}$ ;  $t_0=15^\circ\text{C}$ ;  $w_0=10$  м/с;  $u=4$  м/с

Fig. 9. Width of the field of radioactive noble gases concentrations ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) in the surface layer in the direction of the wind: category A;  $z_0=40$  cm;  $t=+20^\circ\text{C}$ ;  $t_0=15^\circ\text{C}$ ;  $w_0=10$  m/s;  $u=4$  m/s

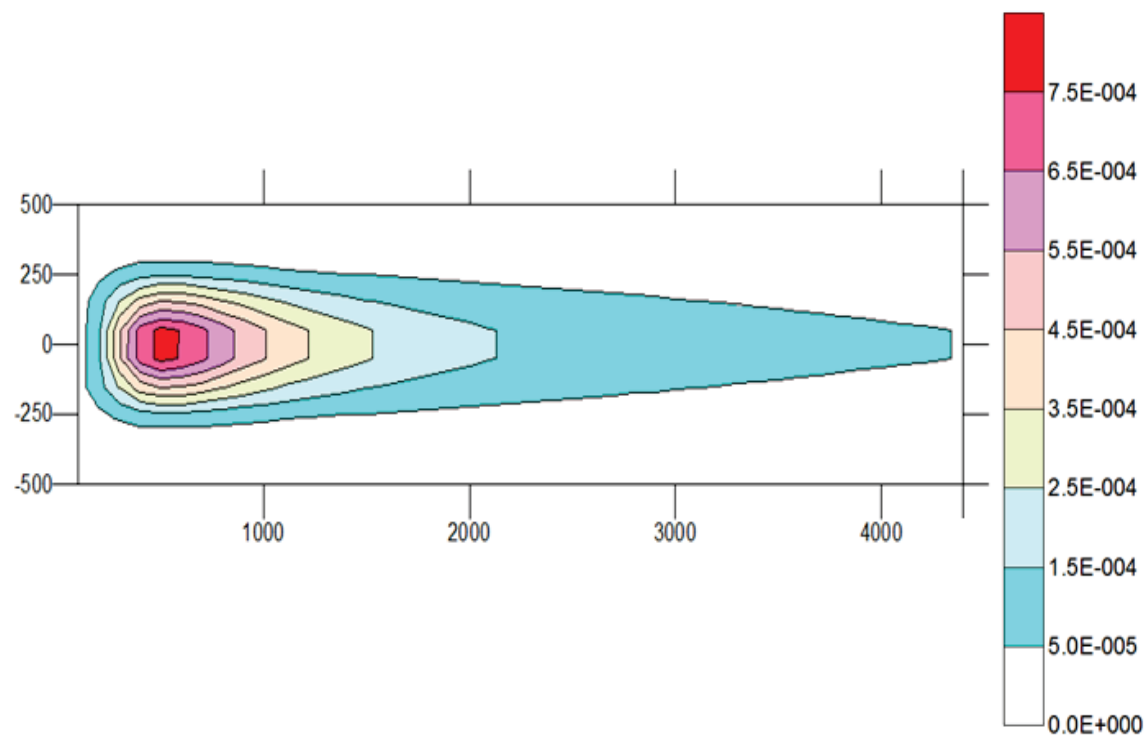


Рис. 10. Ширина поля концентраций соединений йода ( $\text{Бк}/\text{м}^3$ ) в приземном слое по направлению ветра: категория А;  $z_0=40$  см;  $t=+20^\circ\text{C}$ ;  $t_0=15^\circ\text{C}$ ;  $w_0=10$  м/с;  $u=4$  м/с

Fig. 10. Width of concentrations field of iodine compounds ( $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) in the surface layer wind direction: category A;  $z_0=40$  cm;  $t=+20^\circ\text{C}$ ;  $t_0=15^\circ\text{C}$ ;  $w_0=10$  m/s;  $u=4$  m/s

разработан программный комплекс для расчета рассеивания примесей в приземном слое атмосферы по двум методикам: МРР-2017 и Пасквилла.

По результатам исследования сделан вывод о том, что для расчетов рассеивания газообразных загрязняющих веществ от непрерывно действующего источника в условиях постоянства метеорологических факторов предпочтительнее использовать методику Пасквилла, так как она позволяет учесть более широкий набор определяющих параметров, адекватно описывающих местные метеорологические условия и тип подстилающей поверхности.

Разработанный программный комплекс «SKAT» может быть использован для прогнозирования приземных концентраций загрязняющих веществ и расчетов рассеивания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе при решении задач мониторинга выбросов ЗВ в условиях действующих объектов.

Результаты расчетных исследований, выполненных с помощью принятых моделей, показыва-

ют, что основными определяющими факторами являются: состояние атмосферы и температура атмосферного воздуха. Менее заметное влияние оказывает наличие осадков.

С использованием программного комплекса «SKAT» на основе метода Пасквилла выполнены исследования поведения концентраций радионуклидов в приземном слое атмосферы в условиях г. Северска Томской области для проектируемого энергоблока АЭС с реактором БРЕСТ-300 и пристанционным ядерным топливным циклом.

Проведены расчеты концентраций радионуклидов выброса РБГ, йода и аэрозолей в зависимости от скорости ветра для разных категорий устойчивости атмосферы. На основании полученных данных построены графики распределения концентраций и поля концентрации радионуклидов по направлению ветра, анализ которых нанесены изолинии концентраций. Анализ профилей показывает, что за пределами санитарно-защитной зоны значение концентрации радионуклидов невелико.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wark K., Warner C.F., Davis W.T. Air Pollution. Its Origin and Control. 3<sup>rd</sup> ed. – Menlo Park: Addison Wesley Longman Inc., 1998. – 573 p.
2. Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население. Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 8 июня 2010 г. № 465. – М.: Ростехнадзор, 2010. – 111 с.
3. Методы расчетов рассеивания вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. Утв. Приказом Минприроды России от 06.06.2017 г. № 273. – М.: Ростехнадзор, 2017. – 110 с.
4. Индикация компонентами природной среды трансграничного переноса загрязняющих веществ на территорию горного Алтая / Ю.В. Робертус, В.Н. Удачин, Л.П. Рихванов, Д.В. Юсупов, А.В. Кивацкая, Р.В. Любимов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 9. – С. 39–48.
5. Илюшин Б.Б., Митин И.В., Сиковский Д.Ф. Модели функции плотности вероятностей для описания распространения примеси в конвективном пограничном слое атмосферы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 51–59.
6. Оценка влияния метеорологических и орографических условий на аэрозольное загрязнение снежного покрова на юге Томского региона / Б.Д. Белан, В.С. Бучельников, В.Ф. Лысова, Д.В. Симоненков, А.В. Таловская, М.П. Тентюков, Е.Г. Язиков // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31. – № 6. – С. 492–500.
7. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia) / A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov, E.A. Filimonenko, J.-C. Lata, J. Kim, T.S. Shakhova // Environmental Technology. – 17 September 2018. – V 39. – Iss. 18. – P. 2288–2303.
8. Fluorine concentration in snow cover within the impact area of aluminium production plant (Krasnoyarsk city) and coal and gas-fired power plant (Tomsk city) / A.V. Talovskaya, N.A. Osipova, S.A. Polikanova, N.P. Samokhina, E.A. Filimonenko, E.G. Yazikov, I.A. Matveenko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015 – V. 27. – P. 012043–1–012043–6.
9. Duynkerke P.G. Application of the E turbulence closure model to the neutral and stable atmospheric boundary layer // Journal of the Atmospheric Sciences. – 1988. – V. 45. – № 5. – P. 865–880.
10. Arya S. Pal Air Pollution Meteorology and Dispersion. 1<sup>st</sup> ed. – Oxford: Oxford University Press. 1998. – 320 p.
11. Mandurino C., Vestrucci P. Using meteorological data to model pollutant dispersion in the atmosphere // Environmental Modelling & Software. – 2009. – V. 24. – Iss. 2. – P. 270–278.
12. Допустимые выбросы радиоактивных и химических веществ в атмосферу / под ред. Е.Н. Теверовского, И.А. Терновского. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 216 с.
13. Safety assessment for facilities and activities. International Atomic Energy Agency Safety Standards Series No. GSR. Part 4 (Rev. 1). Vienna, IAEA, 2016. 63 p.
14. Fractional derivative models for atmospheric dispersion of pollutants / A.G.O. Goulart, M.J. Lazo, J.M.S. Suarez, D.M. Moreira // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2017. – V. 477. – P. 9–19.
15. Илюшин Б.Б., Курбацкий А.Ф. Моделирование распространения примеси в конвективном пограничном слое атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 1996. – Т. 32. – № 3. – С. 307–322.
16. Методика разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. Утв. приказом Ростехнадзора от 07.11.2012 г. № 639.
17. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнений атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.
18. Van Dop H., Frans T.M. Nieuwstadt // Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling. – Dordrecht: D. Reider Publishing Company, 1981. – 358 p.
19. Encyclopedia of Atmospheric Sciences. 2<sup>nd</sup> ed. Eds: J.A. Curry, J.A. Pyle. – London: Academic Press, 2015. – 2998 p.
20. The comparison of Lagrangian and Gaussian models in predicting of air pollution emission using experimental study, a case study: Ammonia emission / M. Asadi, G. Asadollahfardi, H. Fakhrade, M. Mirmohammadi // Environmental Modeling & Assessment. – 2017. – V. 22. – P. 27–36.
21. Pasquill F., Smith F.B. Atmospheric diffusion. 3<sup>rd</sup> ed. – Chichester: Ellis Horwood Ltd., 1983. – 429 p.

Поступила 04.06.2019 г.

#### **Информация об авторах**

**Антонова А.М.**, кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Воробьев А.В.**, кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Воробьев В.А.**, инженер научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Дутова Е.М.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Покровский В.Д.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

UDC 628.58

## MODELLING DISTRIBUTION OF CONTAMINATING SUBSTANCES OF ELECTRIC POWER EMISSIONS IN THE ATMOSPHERE ON THE BASIS OF THE SKAT PROGRAMMING COMPLEX

Aleksandra M. Antonova<sup>1</sup>,

anton@tpu.ru

Aleksandr V. Vorobev<sup>1</sup>,

worob@tpu.ru

Vladimir A. Vorobev<sup>1</sup>,

worob@tpu.ru

Ekaterina M. Dutova<sup>1</sup>,

dutova@tpu.ru

Vitaly D. Pokrovskiy<sup>2</sup>,

pokrovskiy.v@gmail.com

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance** of the research lies in the necessity of accuracy improvement of independent assessments at forecasting the content of pollutants in the air emitted by energy facilities, including nuclear power plants.

**The aim** of the research is justifying the choice of a method for calculating the gaseous pollutant distribution from continuously operating sources located at high altitude with consideration of meteorological factors and operation test of the software package.

**Objects** of the research are the method of calculating the dispersion of gaseous pollutants MRR-2017 and the Pasquill method for calculating pollution from a continuously operating high source under various steady meteorological conditions.

**Methods:** simulation and computational analysis based on the developed computer software complex «SKAT».

**Results.** Methods for dispersion of gaseous pollutants in the atmosphere: MRR-2017 and Pasquill were analyzed. It was concluded that the Pasquill method based on the Gauss model is preferable for calculating the distribution of gaseous pollutants emitted by energy facilities at various atmospheric conditions of steady meteorological factors. The developed software package «SKAT» can be used to predict pollutant concentration values near the earth surface and calculate dispersion of pollutants in the atmospheric air when solving the problems of monitoring emissions of pollutants in the presence of currently operating enterprises. Using the Gauss model the authors have studied the distribution of the emitted radionuclides concentration in the atmospheric layer next to the earth surface caused by the designed power unit with the BREST-300 reactor and the on-site nuclear fuel cycle for conditions of Seversk city, Tomsk Region.

### Key words:

Pollutants, modeling, dispersion, atmospheric air, turbulent diffusion, environmental protection.

### REFERENCES

1. Wark K., Warner C.F. & Davis W.T. *Air Pollution. Its Origin and Control*. 3<sup>rd</sup> ed. Menlo Park, Addison Wesley Longman Inc., 1998. 573 p.
2. *Polozhenie o povyshenii tochnosti prognosticheskikh otsenok radiatsionnykh kharakteristik radioaktivnogo zagryazneniya okruzhayushchey sredy i dozovykh nagruzok na personal i nasele-nie* [The provision on improving the accuracy of prognostic estimates of the radiation characteristics of radioactive contamination of the environment and dose loads on personnel and the public]. Utv. prikazom Federalnoy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 8 iyunya 2010 g. № 465 [Approved by the Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated June 8, 2010 No. 465]. Moscow, Rostekhnadzor Publ., 2010. 111 p.
3. *Metody raschetov rasseivaniya vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmosfernom vozdukh* [Calculation methods for dispersion of harmful (polluting) substances in the atmospheric air]. Utv. Prikazom Minprirody Rossii ot 06.06.2017 g. № 273 [Approved by the order of the Ministry of Natural Resources of Russia of 06.06.2017, No. 273]. Moscow, Rostekhnadzor Publ., 2017. 110 p.
4. Robertus Yu.V., Udachin V.N., Rikhvanov L.P., Yusupov D.V., Kivatskaya A.V., Lyubimov R.V. Indication by components of the natural environment of transboundary transport of pollutants to the territory of the mountainous Altai]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 9, pp. 39–48. In Rus.
5. Ilyushin B.B., Mitin I.V., Sikovskii D.F. Models of probability density function for describing pollutant distribution in convective planetary boundary layer. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 7, pp. 51–59. In Rus.
6. Belan B.D., Buchelnikov V.S., Lysova V.F., Simonenkov D.V., Talovskaya A.V., Tentyukov M.P. and Yazikov E. G. Estimation of the Effect of Meteorological and Orographic Conditions on Aerosol Contamination of the Snow Cover in the South of Tomsk Region. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2018, vol. 31, no. 06, pp. 656–664.
7. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A., Lata J.-C., Kim J., Shakhova T.S. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia). *Environmental Technology*, 2018, vol. 39, Iss. 18, pp. 2288–2303.

8. Talovskaya A.V., Osipova N.A., Polikanova S.A., Samokhina N.P., Filimonenko E.A., Yazikov E.G., Matveenko I.A. Fluorine concentration in snow cover within the impact area of aluminium production plant (Krasnoyarsk city) and coal and gas-fired power plant (Tomsk city). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, vol. 27, pp. 012043–1–012043–6.
9. Duynkerke P.G. Application of the E turbulence closure model to the neutral and stable atmospheric boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988, vol. 45, no. 5, pp. 865–880.
10. Arya S. *Pal Air Pollution Meteorology and Dispersion*. 1<sup>st</sup> ed. Oxford, Oxford University Press. 1998. 320 p.
11. Mandurino C., Vestrucci P. Using meteorological data to model pollutant dispersion in the atmosphere. *Environmental Modelling & Software*, 2009, vol. 24, Iss. 2, pp. 270–278.
12. *Dopustimye vybrosov radioaktivnykh i khimicheskikh veshchestv v atmosferu* [Permissible emissions of radioactive and chemical substances into the atmosphere]. Eds. E.N. Teverovsky, I.A. Ternovsky. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1985. 216 p.
13. Safety assessment for facilities and activities. *International Atomic Energy Agency Safety Standards Series No. GSR. Part 4* (Rev. 1). Vienna, IAEA, 2016. 63 p.
14. Goulart A.G.O., Lazo M.J., Suarez J.M.S., Moreira D.M. Fractional derivative models for atmospheric dispersion of pollutants. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2017, vol. 477, pp. 9–19.
15. Ilyushin B.B., Kurbatskii A.F. Modelirovanie rasprostraneniya primesi v konvektivnom pogranichnom sloe atmosfery [Simulation of distribution of impurities in the convective atmospheric boundary layer]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Fizika atmosfery i okeana*, 1996, vol. 32, no. 3, pp. 307–322.
16. *Metodika razrabotki i ustanovleniya normativov predelno dopustimyykh vybrosov radioaktivnykh veshchestv v atmosfery vozdukh* [Methods of developing and establishing standards for maximum permissible emissions of radioactive substances into the air]. Utv. prikazom Rostekhnadzora ot 07.11.2012 g. № 639 [Approved by the Order of Rostekhnadzor dated 07.11.2012, No. 639].
17. Berlyand M.E. *Prognoz i regulirovanie zagryazhenii atmosfery* [Prediction and regulation of air pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 272 p.
18. Van Dop H., Frans T.M. Nieuwstadt. *Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling*. Dordrecht, D. Reider Publishing Company, 1981. – 358 p.
19. *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*. 2<sup>nd</sup> ed. Eds: J.A. Curry, J.A. Pyle. London, Academic Press, 2015. 2998 p.
20. Asadi M., Asadollahfardi G., Fakhradee H., Mirmohammadi M. The comparison of Lagrangian and Gaussian models in predicting of air pollution emission using experimental study, a case study: Ammonia emission. *Environmental Modeling & Assessment*, 2017, vol. 22, pp. 27–36.
21. Pasquill F., Smith F.B. *Atmospheric diffusion*. 3<sup>rd</sup> ed. Chichester, Ellis Horwood Ltd., 1983. 429 p.

Received: 4 June 2019.

#### Information about the authors

**Aleksandra M. Antonova**, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Aleksandr V. Vorobev**, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vladimir A. Vorobev**, engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Ekaterina M. Dutova**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vitaly D. Pokrovskiy**, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk State University.

УДК 550.832

## АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ И ИНВЕРСИИ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДА С ТОРОИДАЛЬНЫМИ КАТУШКАМИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ МАКРОАНИЗОТРОПНЫХ СВОЙСТВ ПЛАСТОВ-КОЛЛЕКТОРОВ

Эпов Михаил Иванович<sup>1</sup>,  
EpovMI@ipgg.sbras.ru

Михайлов Игорь Владиславович<sup>1</sup>,  
MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

Глинских Вячеслав Николаевич<sup>1</sup>,  
GlinkikhVN@ipgg.sbras.ru

Никитенко Марина Николаевна<sup>1</sup>,  
NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

Суродин Ирина Владимировна<sup>2</sup>,  
sur@ommfao1.sccc.ru

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

<sup>2</sup> Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработки базовых алгоритмов обработки и инверсии данных нового многокатушечного многочастотного мультимодного электромагнитного зонда с тороидальными катушками, предназначенного для изучения электрической макроанизотропии горных пород, определения характера насыщения пород-коллекторов, выделения тонкослоистых песчано-глинистых нефтенасыщенных интервалов и зон трещиноватости.

**Цель:** разработать базовые алгоритмы обработки и инверсии данных нового электромагнитного зонда с тороидальными катушками для изучения макроанизотропных свойств пластов-коллекторов сложного геологического строения (тонкослоистых, трещиноватых).

**Объекты:** сигналы нового электромагнитного зонда с тороидальными катушками.

**Методы:** численное моделирование на основе сеточного метода конечных разностей и сравнительный анализ сигналов нового электромагнитного зонда с тороидальными катушками.

**Результаты.** Разработаны базовые алгоритмы обработки и инверсии данных нового электромагнитного зонда с тороидальными катушками. Среди них: алгоритмы трансформации сигналов в кажущееся удельное электрическое сопротивление и коэффициент электрической анизотропии, выделения контрастных геоэлектрических границ, а также программные средства численной инверсии с определением параметров изотропного и анизотропного пласта с учётом удельного электрического сопротивления вмещающей среды. Вычислительные алгоритмы объединены в единую компьютерную программу количественной интерпретации данных нового электромагнитного зонда с тороидальными катушками. Выполнено тестирование алгоритмов на зашумлённых синтетических данных, и показана их эффективность при обработке практических данных из разрезов нефтегазовых скважин в Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. Выполненные исследования демонстрируют, что новый электромагнитный зонд с тороидальными катушками имеет высокий потенциал для применения в геологических разрезах сложного строения.

### Ключевые слова:

Геофизические исследования в скважинах, тороидальные катушки, удельное электрическое сопротивление, электрическая анизотропия, численная инверсия, сложнопостроенный коллектор, нефтенасыщение.

### Об изучении макроанизотропных свойств пластов-коллекторов

Вовлечение в изучение и разработку новых типов нефтегазовых залежей приводит к расширению круга задач промысловой геофизики. Одна из них связана с нефтенасыщенными коллекторами, представленными тонким переслаиванием песчаных и глинистых прослоев.

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) – основная электрофизическая характеристика горных пород, по которой определяется тип насыщения (газ, нефть или вода). Как известно, УЭС нефтенасыщенного коллектора всегда выше, чем водо-

насыщенного. Однако такое соотношение соблюдается не всегда, например, при наличии глинистых минералов в горных породах УЭС коллектора невысокое, в частности, в тонкослоистом песчано-глинистом. При этом он может содержать значительное количество нефтенасыщенных прослоев.

Определение УЭС пластов выполняется по измерениям на постоянном и переменном токах. Оценка УЭС и мощности отдельных прослоев тонкослоистого коллектора не представляется возможной, в силу их большого числа. Поэтому разделение по типу насыщения выполняют, определяя значения горизонтального ( $\rho_h$ ) и вертикального

( $\rho_v$ ) УЭС или коэффициента электрической анизотропии  $\lambda = \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_h}}$ . Соотношение электрических и

электромагнитных сигналов в тонкослоистой и макроанизотропной среде исследовано С.М. Рытовым [1]. Л.М. Альпиным показано, что при субвертикальном пересечении скважиной тонкослоистого пласта измеренные электрокаротажные сигналы зависят только от горизонтального УЭС [2, 3]. Поэтому полученные при стандартной интерпретации данных в тонкослоистых коллекторах значения УЭС будут значительно занижены по сравнению со значениями в нефтенасыщенных прослоях и будут соответствовать водонасыщенным песчаникам. Так, в последующем с увеличением числа неучтённых глинистых прослоев возрастает ошибка определения подсчётных запасов углеводородов по данным УЭС стандартных приборов каротажа.

Традиционно параметры макроанизотропного коллектора определяют по измерениям многокомпонентными зондами с ортогональными катушками [4]. Такие зондовые системы используются ведущими зарубежными компаниями Baker Hughes GE, Halliburton, Schlumberger, Weatherford. Так, трёхкомпонентные измерения известными приборами Rt Scanner (Schlumberger) и 3D eXplorer (Baker Hughes GE), в отличие от измерений зондами индукционного каротажа, широко используются для выявления и оценки нефтенасыщения электрически макроанизотропных коллекторов, в том числе уже упомянутых выше низкоомных, а также трещиноватых карбонатов и глинистых покрышек [5]. Из практики известно, что с использованием стандартных методов некоторые нефтенасыщенные толщи и вовсе пропускаются, поскольку, как уже отмечалось, интерпретируются как водонасыщенные [6]. Однако такие специальные многокомпонентные системы редко используются в отечественной практике и к тому же требуют привлечения ресурсоемких вычислительных схем и процедур интерпретации, что снижает эффективность их применения. Также известны другие разработки по моделированию нового каротажного зонда для определения коэффициента электрической анизотропии пород, в котором источником сигнала является магнитный диполь, а измеряется напряжение одной из компонент электрического поля в короткой измерительной линии [7].

Изучение электрической макроанизотропии геологической среды возможно также с использованием тороидальных катушек (замкнутого соленоида), но их применение в каротаже для определения УЭС горных пород и коэффициента электрической анизотропии, в том числе в процессе бурения, малоизвестно. Работа J.J. Arps наиболее ран-

няя [8]. В описанной им конфигурации используются две генераторные катушки и две измерительные, симметрично расположенные между ними на металлическом корпусе зонда. В это же время Д.С. Даев математически описывает источник в виде кругового магнитного тока, соответствующего тороидальной катушке [9]. Дальнейшее развитие при изучении как вертикальных, так и горизонтальных скважин нашло своё отражение в работе S. Gianzero с коллегами [10]. Идея азимутальных измерений также реализована с использованием тороидальных катушек, расположенных на корпусе зонда, которые обеспечивают построение электрических имиджей [11]. Возможности определения электрической макроанизотропии с помощью тороидальных катушек исследовались рядом учёных [12–15], в то время как более поздние работы посвящены повышению разрешающей способности каротажных зондов с тороидальными катушками [16].

#### Новый электромагнитный зонд с тороидальными катушками

На основе ряда новых теоретико-методических и инженерно-технических идей предложен, спроектирован, разработан и апробирован зонд электромагнитный с тороидальными катушками (ЗЭТ) с высоким пространственным разрешением [17, 18]. Многокатушечный многочастотный мультимодальный зонд состоит из цилиндрического металлического немагнитного корпуса, двух генераторных катушек, нескольких измерительных тороидальных катушек, размещённых на корпусе [19, 20]. Тороидальные катушки расположены симметрично относительно центра зонда длиной 1,0 м, используемые частоты – 50, 100, 250 кГц (рис. 1). Благодаря высокой удельной электропроводности металла плотность поверхностного тока значительна даже при невысоких значениях моментов генераторных катушек.

ЗЭТ имеет оригинальную систему возбуждения–наблюдения. Реализуются два режима: суммарный режим, в котором токи в генераторных катушках равны между собой и сонаправлены, и дифференциальный режим, где они равны и противоположны по знаку (рис. 2). Первый режим применяется для выделения границ пластов в вертикально-неоднородном разрезе, определения пространственного распределения УЭС и коэффициента электрической анизотропии, а второй – для выделения границ и зон трещиноватости.

От тороидального источника на металлическом корпусе в геологической среде возбуждается переменное электрическое поле, которое имеет как горизонтальную, так и вертикальную компоненты. Вследствие этого регистрируемые сигналы зависят



Рис. 1. Фото ЗЭТ

Fig. 1. Photo of the electromagnetic tool with toroidal coils (TTC)

не только от горизонтального, но и от вертикального УЭС пересекаемого скважиной пласта (рис. 3). Выполняются измерения реальной и мнимой частей плотности тока, протекающего по корпусу прибора. ЗЭТ разработан для изучения электрической макроанизотропии горных пород, определения характера насыщения пород-коллекторов, выделения тонкослоистых песчано-глинистых нефтенасыщенных интервалов и зон трещиноватости.



Рис. 2. Модель ЗЭТ. Слева – суммарный режим, справа – дифференциальный режим

Fig. 2. TTC model. On the left – summary mode, on the right – differential mode

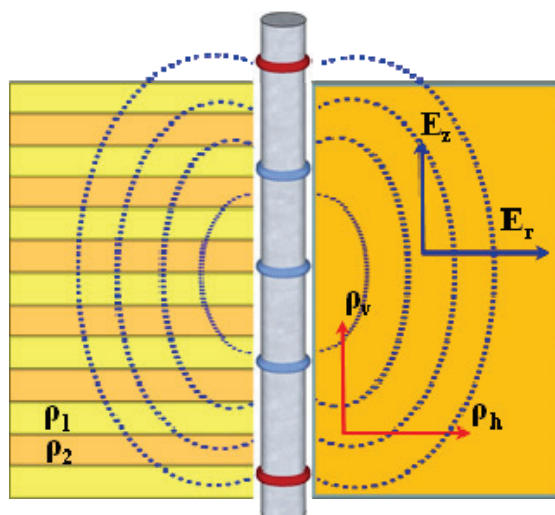


Рис. 3. ЗЭТ в модели тонкослоистого песчано-глинистого коллектора (слева) и эквивалентной макроанизотропной модели (справа)

Fig. 3. TTC in the model of a thin-layered sandy-argillaceous reservoir (left) and equivalent macroanisotropic model (right)

При интерпретации результатов измерения ЗЭТ используются двумерные модели геологической среды, в которых учитываются конечные размеры металлического корпуса. С привлечением современного математического аппарата разработаны базовые вычислительные алгоритмы для обработки и интерпретации данных ЗЭТ.

### Описание базовых вычислительных алгоритмов для обработки и интерпретации данных ЗЭТ

Разработаны и программно реализованы алгоритмы трансформации сигналов в кажущееся УЭС и коэффициент электрической анизотропии, выделения контрастных геоэлектрических границ, численной инверсии с определением геоэлектрических параметров изотропного и анизотропного пласта, в том числе с учётом УЭС вмещающей среды (рис. 4).

Входными данными для программы численной инверсии являются амплитуды и фазы или реальные и мнимые части измеренных зондом сигналов в суммарном и дифференциальном режиме. Также на вход подаются УЭС бурового раствора и радиус скважины, и некоторые другие параметры, контролирующие работу программы. Выходными данными являются: границы пластов, трансформации сигналов (кажущееся УЭС и коэффициент электрической анизотропии) на разных частотах и результат двумерной инверсии – УЭС пластов, с учётом влияния УЭС вмещающих пород, также на разных частотах.

Алгоритмы протестированы в большом диапазоне параметров типичных геоэлектрических моделей пластов-коллекторов, с дальнейшей апробацией при обработке практических данных.

### Выделение границ изотропных пластов

Геоэлектрические границы определяются по сигналам суммарного и дифференциального режимов по результатам анализа характерных экстремумов сигналов в результате их преобразований. Преобразования представляют собой разность или сумму сигналов, зарегистрированных на крайних измерительных катушках, нормированную на сигнал в центральной катушке, что является аналогом производной и среднего за счёт выбранной конфигурации зондовой системы. Определённые таким образом положения границ, соответствующие экстремумам на преобразованных сигналах по суммарному и дифференциальному режиму, сравниваются между собой и при совпадении в пределах нескольких отсчётов представляют собой окончательный результат по расстановке границ.

### Выделение границ анизотропных интервалов

Выделение границ анизотропных интервалов производится по преобразованным сигналам суммарного режима тем же способом, что и описан выше. При этом используется следующий критерий: если в заданном окне по глубине имеется несколько прослоев мощностью меньшей, либо равной заданной (например, окно 1 м – 5 прослоев по 0,2 м), интервал является анизотропным. Реализован и другой вариант расстановки границ, в котором во всех точках выделенного интервала производится одновременное определение значений кажущегося УЭС и коэффициента электрической анизотропии, если анизотропные интервалы в явном виде не выделяются (например, если переслаивание слишком мелкое).



Рис. 4. Блок-схема вычислительных способов обработки и интерпретации результатов измерения ЗЭТ

Fig. 4. Block diagram of computational methods for processing and interpreting the results of TTC measurements

#### Трансформация в кажущееся УЭС на изотропных интервалах

Трансформация в кажущееся УЭС на изотропных интервалах выполняется поточно, без учёта влияния УЭС вмещающих пород, с использованием палеток «скважина – изотропный пласт». Трансформация сигналов в кажущееся УЭС выполняется с помощью палеток, рассчитанных для разных УЭС и радиусов скважины с учётом конечных размеров металлического корпуса прибора. Для заданного значения УЭС бурового раствора скважины производится линейная интерполяция между значениями двух соседних узлов палеток. Подбираются такие значения УЭС пласта, чтобы расхождение между синтетическими и практическими данными было минимально.

#### Трансформация в кажущееся УЭС и коэффициент электрической анизотропии на анизотропных интервалах

Эта аналогичная трансформация также выполняется поточно, без учёта влияния УЭС вмещающих пород с использованием палеток «скважина – анизотропный пласт» при значениях коэффициента электрической анизотропии  $\lambda$  от 1 до 4. Подбираются такие значения УЭС пласта и коэффициента электрической анизотропии, чтобы расхождение между синтетическими и практическими данными было минимально.

#### Численная инверсия для определения пространственного распределения УЭС пласта

Численная двумерная инверсия с определением УЭС производится для пластов, мощность кото-

рых не превышает 3,0 м, с учётом УЭС вмещающих пород. Для ускорения вычисления рассчитаны палетки для различных значений УЭС пласта и вмещающих пород, являющихся входными данными для численной инверсии. Все палетки рассчитаны с геометрическим шагом с использованием программы двумерного моделирования конечно-разностным методом [21] с учётом корпуса прибора для мощностей пластов от 0,5 до 3,0 м.

С использованием вышеописанных палеток «скважина–пласт–вмещающая среда» выполняется двумерная инверсия данных после предварительного выделения границ пластов, с определением значений УЭС пласта. Выбирается пласт, находится его УЭС в предположении, что вмещающие породы сверху и снизу – полупространства. В качестве результата выбирается УЭС пласта, для которого выполняется инверсия, а УЭС вмещающих пород в результат не попадают.

Особенности алгоритма заключаются в следующем.

Во-первых, палетки рассчитываются для ряда глубин, симметрично расположенных относительно центра пласта. Если глубины практических данных не совпадают с рассчитанными, выполняется сплайн-интерполяция измеренных сигналов кубическими сплайнами в палеточные глубины. Во-вторых, линейная интерполяция палеточных данных выполняется по мощности пласта, если мощность выбранного пласта не совпадает с палеточной. Если мощность превышает максимальную (3,0 м), в качестве искомого УЭС берётся УЭС однородной среды по усреднённому значению в трёх средних точках пласта. Если мощность пласта меньше 0,5 м,

используется палетка, соответствующая мощности 0,5 м. В-третьих, учитываются глубины, попадающие внутрь пласта и в его ближайшей окрестности, что значительно сокращает возможную эквивалентность. Выполняется отбрасывание лишних точек за пределами пласта, при этом сверху и снизу от границ пласта добавляется по одной точке. Иными словами, используется переменное число глубин в зависимости от мощности пласта.

Помимо этого, вычисляются существенные значения в виде средних пластовых значений по электропроводности для визуализации УЭС в разрезе в виде кусочно-постоянной функции.

#### Тестирование основных вычислительных алгоритмов

Проведённое тестирование основных вычислительных алгоритмов на синтетических данных, рассчитанных для типичных геоэлектрических ситуаций (терригенный песчано-глинистый разрез, карбонатный трещиноватый разрез) с изотропными и анизотропными пластами, демонстрирует их высокую эффективность.

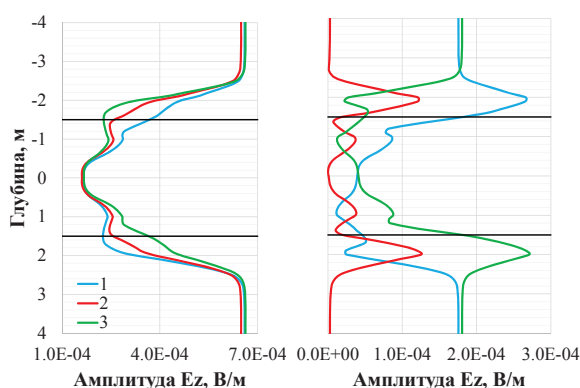


Рис. 5. Диаграммы суммарного (слева) и дифференциального (справа) режимов ЗЭТ в модели нефтеводонасыщенного песчаника в глинистых отложениях. Операционная частота 100 кГц. Шифр – расстояние от генераторной до приёмной катушки (м): 1) 0,25; 2) 0,5; 3) 0,75

Fig. 5. TTC logs in the summary (left) and differential (right) modes in the model of an oil-saturated sandstone in argillaceous deposits. Frequency is 100 kHz. The key is the distance from the generator to receiving coil (m): 1) 0,25; 2) 0,5; 3) 0,75

Из анализа диаграммы амплитуды вертикальной компоненты электрического поля в суммарном и дифференциальном режимах ЗЭТ в модели трёхметрового нефтеводонасыщенного песчаника (УЭС 10,0 Ом·м), залегающего в глинах (УЭС 1,0 Ом·м) (рис. 5), следует, что диаграммы суммарного режима отражают геоэлектрические условия флюидонасыщенного коллектора, а дифференциального – особенности перехода через границы. При этом диаграммы зонда 0,5 м симметричны относительно центра пласта, в то время как диаграммы зондов 0,25 и 0,75 м зеркально симметричны. Асимптотические значения сигналов достигаются на расстоянии около 1,0 м от границ пласта, при этом для зондов 0,25 и 0,75 м они совпадают. В центре пласта и на асимптотах значения сигнала

суммарного режима близки между собой, в то время как при длине зонда 0,5 м сигнал дифференциального режима нулевой. Положение экстремумов смещено относительно границ на 0,5 м, при этом два ближайших измерителя показывают максимальные значения, а удалённый – минимальное. Это справедливо для всех рассмотренных частот и различных контрастов электрофизических параметров в симметричных моделях.

Из анализа преобразованных диаграмм суммарного и дифференциального режимов для автоматического выделения геоэлектрических границ (координаты –1,5 и 1,5 м) (рис. 6) следует, что границы выделены с высокой степенью локальности: ошибка не превышает одного отсчёта по глубине.

Результаты масштабного численного моделирования сигналов ЗЭТ показывают, что минимальная толщина пласта, надёжно выделяемого по его данным, составляет 0,5 м.

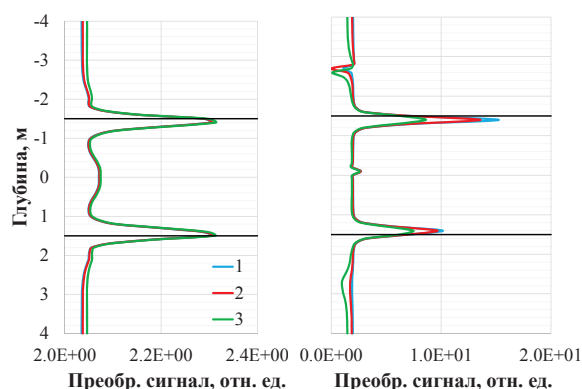


Рис. 6. Выделение границ по преобразованным диаграммам суммарного (слева) и дифференциального (справа) режимов ЗЭТ в модели нефтеводонасыщенного песчаника в глинистых отложениях. Шифр – операционная частота (кГц): 1) 50; 2) 100; 3) 250

Fig. 6. Detection of boundaries from the transformed logs of the summary (left) and differential (right) TTC modes in the model of an oil-saturated sandstone in argillaceous deposits. The key is frequency (kHz): 1) 50; 2) 100; 3) 250

В модели сложнопостроенного контрастного геологического разреза мощности пластов изменяются в диапазоне 0,2–4,0 м, УЭС – от 1,5 до 150 Ом·м (рис. 7 справа, чёрным цветом). Из анализа результата автоматической двумерной инверсии (лиловый цвет) следует, что наибольшие погрешности восстановления УЭС (12,0 и 33,5 %) наблюдаются на интервалах 0–4,0 и 7,4–8,0 м, соответственно. В первом случае она обусловлена дискретностью палеточных значений УЭС для ускорения расчётов, а во втором – влиянием низкоомных вмещающих отложений на сигнал в малоомощном пласте. Наибольшая погрешность восстановления границы – на интервале 0–4,0 м, где полученная координата нижней границы – 3,5 м, что обусловлено влиянием нижезалегающего пропластка с пониженным УЭС. В ходе автоматической двумерной инверсии восстановлены все основные особенности геоэлектрического разреза.

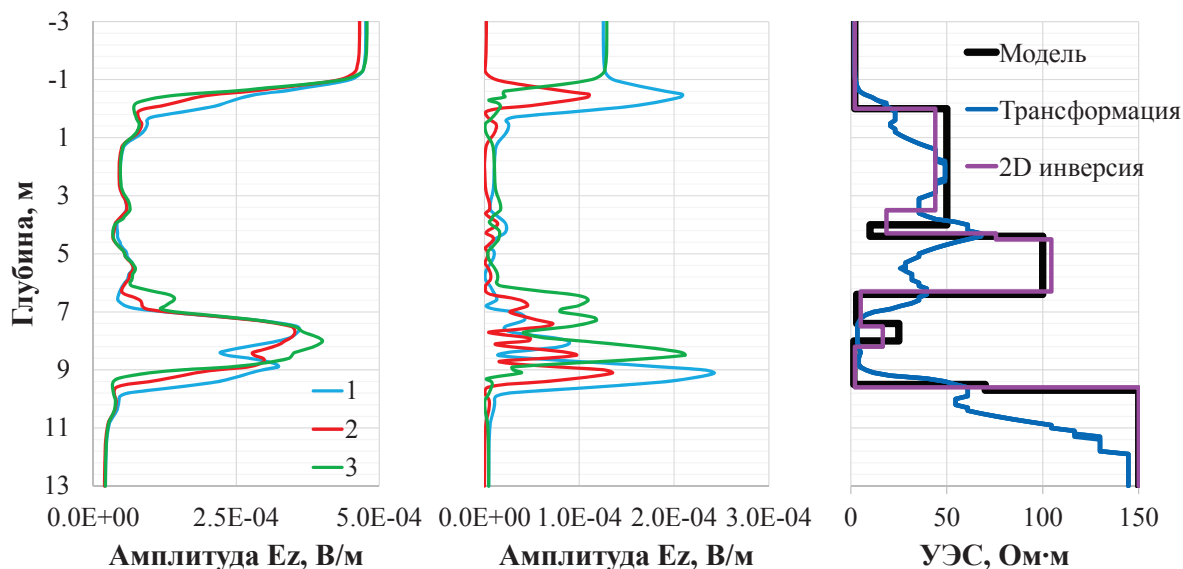


Рис. 7. Диаграммы ЗЭТ в суммарном (слева) и дифференциальном (по центру) режимах и результаты трансформации и двумерной инверсии (справа) в модели сложнопостроенного геологического разреза. Шифр слева – расстояние от генераторной до приёмной катушки

Fig. 7. TTC logs in the summary (left) and differential (center) modes and the results of transformation and two-dimensional inversion (right) in the model of a complex geological section. Left key is the distance from the generator to receiving coil

Синим цветом показан результат трансформации сигналов в значения кажущегося УЭС на разных частотах. Наибольшие различия от результата двумерной инверсии отмечаются в маломощных пластах (4,0–4,4; 7,4–8,0 м), а также в более мощном пласте (4,4–6,4 м), в котором существенное влияние на сигнал оказывают проводящие вмещающие породы. Небольшие расхождения между истинным и восстановленным УЭС на интервале нижней асимптоты объясняются дискретностью палеточных значений.

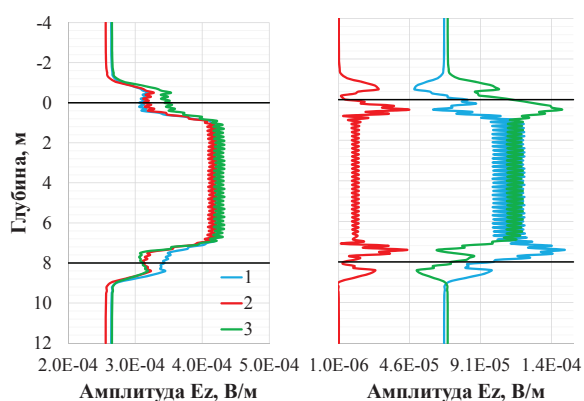


Рис. 8. Диаграммы ЗЭТ в суммарном (слева) и дифференциальном (справа) режимах в модели тонкослоистого песчано-глинистого коллектора в аргиллитах. Операционная частота 100 кГц. Шифр – расстояние от генераторной до приёмной катушки

Fig. 8. TTC logs in the summary (left) and differential (right) modes in the model of a thin-bedded sandy-argillaceous reservoir in argillites. Frequency is 100 kHz. The key is the distance from the generator to receiving coil

Для оценки возможности определения параметров макроанизотропных коллекторов на рис. 8 представлены результаты моделирования сигналов ЗЭТ в модели тонкослоистого песчано-глинистого коллектора (УЭС песчаника 10,0 Ом·м, УЭС глины 1,0 Ом·м, мощности пропластков 0,1 м), залегающего в аргиллитах (УЭС 5,0 Ом·м) и характеризующегося макроанизотропными свойствами (горизонтальное УЭС 1,82 Ом·м, коэффициент электрической анизотропии 1,74). Границы коллектора имеют координаты 0,0 и 8,0 м. На рисунке видно, что маломощные пропластки проявляются на всех диаграммах ЗЭТ характерной периодичностью.

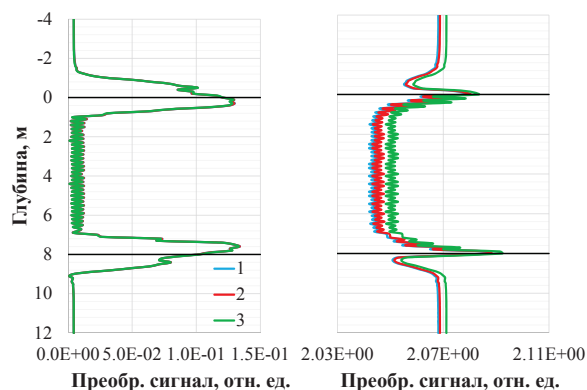


Рис. 9. Выделение границ по преобразованным диаграммам суммарного режима ЗЭТ в модели тонкослоистого песчано-глинистого коллектора в аргиллитах. Шифр – операционная частота

Fig. 9. Detection of boundaries from the transformed logs of the TTC summary mode in the model of a thin-layered sandy-argillaceous reservoir in argillites. The key is frequency

По преобразованным диаграммам суммарного режима и автоматически выделенным границам анизотропного интервала (рис. 9) видно, что границы выделены с высокой степенью локальности: ошибка не превышает двух отсчётов по глубине.

На рис. 10 чёрным цветом показаны модельные распределения горизонтального УЭС, определяемого традиционными методами скважинной электротометрии (ВИКИЗ, БК, ИК) (слева), и коэффициента анизотропии (справа), а цветами – их медианно осреднённые и восстановленные в ходе трансформации значения. Горизонтальное УЭС восстановлено с ошибкой не более 5,0 %, а коэффициент анизотропии – не более 3,5 %. Выход на асимптотические значения, соответствующие вмещающим аргиллитам, происходит на расстоянии около 1,5 м от границ.

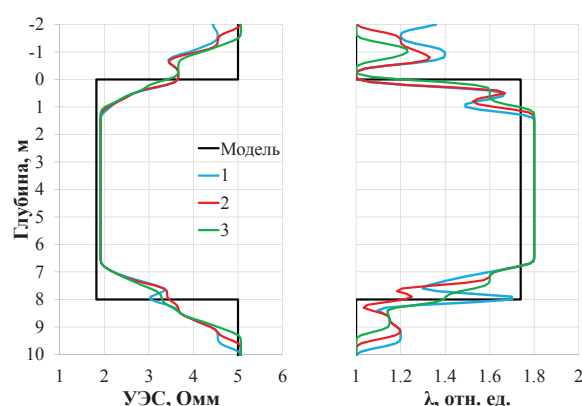


Рис. 10. Результаты трансформации измеряемых сигналов ЗЭТ в горизонтальное УЭС (слева) и коэффициент электрической анизотропии (справа). Шифр – операционная частота

Fig. 10. Results of transformation of the measured TTC signals to the horizontal resistivity (left) and electrical anisotropy coefficient (right). The key is frequency

Погрешность определения геоэлектрических параметров в зависимости от уровня шума в регистрируемых сигналах ЗЭТ в геоэлектрических моделях разной степени сложности будет изучена в дальнейших исследованиях.

#### Обработка и двумерная инверсия практических данных ЗЭТ

Для апробации разработанных алгоритмов на практических диаграммах выполнена обработка и двумерная инверсия данных ЗЭТ из скважины с месторождения Самарской области (Волго-Уральская нефтегазоносная провинция), вскрывшей разрез сложного геологического строения, включающего как терригенные, так и карбонатные отложения.

Анализируются диаграммы амплитуды тока в суммарном и дифференциальном режимах на интервале переслаивания глин и песчаников (рис. 11). По дифференциальному режиму отмечается более высокая степень расчленения геоэлектрического разреза. Диаграммы суммарного режи-

ма характеризуются наибольшими значениями в интервале  $\times \times 25,0 - \times \times 33,0$  м, который является нижней частью мощного глинистого пласта.

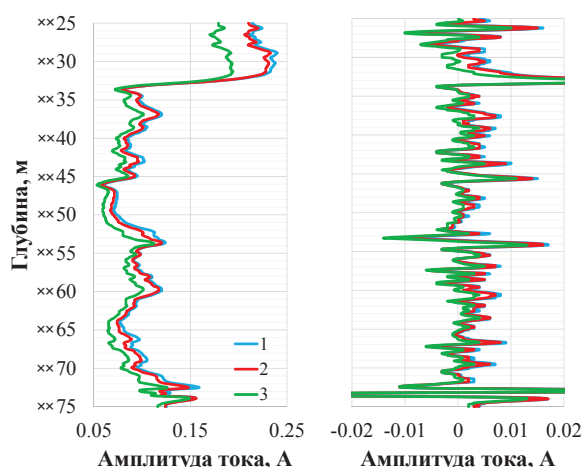


Рис. 11. Практические диаграммы ЗЭТ в суммарном (слева) и дифференциальном (справа) режимах из скважины Самарской области на интервале тонкого переслаивания глин и песчаников. Шифр – операционная частота

Fig. 11. TTC practical logs in the summary (left) and differential (right) modes from a borehole in Samara Region at the interval of thin lamination of argillaceous deposits and sandstones. The key is frequency

К диаграммам суммарного и дифференциального режимов применён алгоритм автоматического выделения геоэлектрических границ (рис. 12, чёрным слева). В случае необходимости более плотного выделения границ предусмотрена возможность задания другого числового критерия.

При анализе результатов трансформации в кажущееся УЭС и коэффициент электрической анизотропии, а также результатов двумерной инверсии (рис. 12), отмечается, что ниже отметки  $\times \times 33,0$  м УЭС изменяется в диапазоне от 5 до 15 Ом·м, а коэффициент электрической анизотропии – от 1,0 до 2,5 отн. ед. Изменение последнего вызвано тонким переслаиванием различной литологии (глин и песчаников), причём повышенные значения приурочены к нефтенасыщению. Это подтверждается результатами испытания скважины на рассматриваемом интервале, предоставленными нефтедобывающим предприятием. Различие результатов трансформации в кажущееся УЭС и коэффициент электрической анизотропии, а также двумерной инверсии на разных частотах объясняется влиянием зоны проникновения фильтрата бурового раствора на представленном интервале. В целом отмечается высокая степень корреляции результатов трансформации в кажущееся УЭС и двумерной инверсии.

#### Заключение

По результатам численных исследований для нового многокатушечного многочастотного мультирежимного электромагнитного зонда с тороидальными катушками ЗЭТ разработаны алгорит-

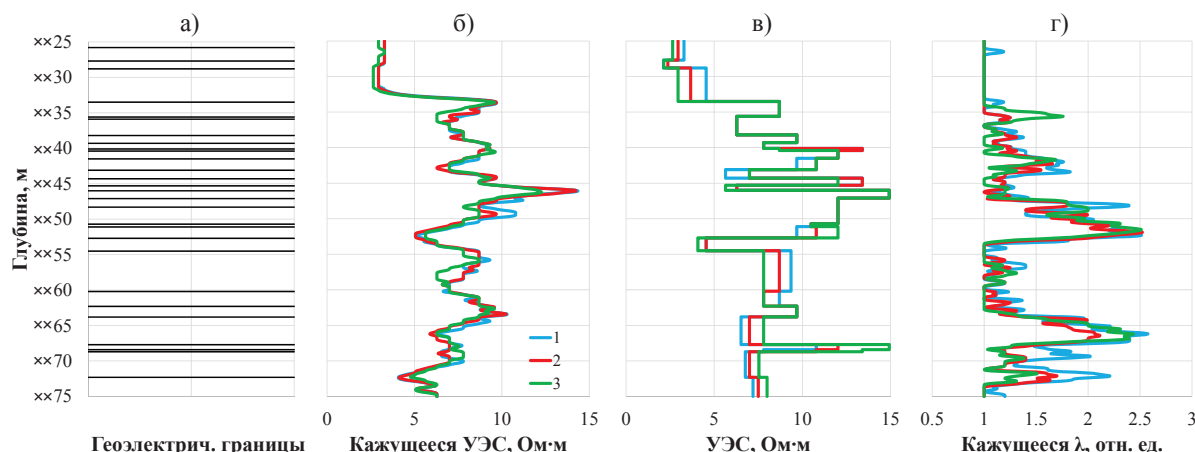


Рис. 12. Результаты автоматического выделения границ (а), трансформации в кажущееся УЭС (б), двумерной инверсии (в) и определения коэффициента электрической анизотропии ( $\lambda$ ) по данным ЗЭТ на интервале маломощных глинистых песчаников из скважины Самарской области. Шифр – операционная частота

Fig. 12. Results of automatic selection of boundaries (a), transformation into the apparent resistivity (b), two-dimensional inversion (c) and determination of the electrical anisotropy coefficient ( $\lambda$ ) according to TTC data at the interval of thin argillaceous sandstones from the borehole in Samara Region. The key is frequency

мы трансформации сигналов в кажущиеся УЭС и коэффициент электрической анизотропии, выделения контрастных геоэлектрических границ, а также программные средства численной инверсии с определением параметров изотропного и анизотропного пласта с учётом УЭС вмещающей среды. Выполнено тестирование алгоритмов на синтетических данных, и показана их эффективность при обработке практических данных из разрезов скважин в Волго-Уральской нефтегазоносной провинции. Вычислительные алгоритмы объединены в единую компьютерную программу количественной интерпретации данных электромагнитного зонда с тороидальными катушками. Результатами показано, что для выделения геоэлектрических границ с высокой степенью локальности необходимо совместно использовать диаграммы суммарного и дифференциального режимов. Диаграммы суммарного режима применяются для определения электрофизических характеристик флюидонасы-

щенных коллекторов. Параметры сложнопостроенного контрастного геологического разреза восстанавливаются в ходе трансформации и двумерной инверсии с достаточной для практических задач точностью. Выполненные исследования показывают, что новый электромагнитный зонд с тороидальными катушками имеет высокий потенциал для применения в геологических разрезах сложного строения (тонкослоистых, трещиноватых). В дальнейшем планируется усовершенствование системы количественной интерпретации данных ЗЭТ, включающее оптимизацию дискретизации палеточных узлов, учёт зоны проникновения и оценку ошибки определения геоэлектрических параметров. Другой аспект исследования связан с изучением возможностей ЗЭТ в наклонно-горизонтальных скважинах, в том числе при решении задач геонавигации.

Научные исследования выполнены при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00595).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рытов С.М. Электромагнитные свойства мелкослоистой среды // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1955. – Т. 29. – Вып. 5. – С. 605–616.
2. Альпин Л.М. Определение поперечного удельного сопротивления пластов по измерениям в скважинах // Известия вузов. Геология и разведка. – 1978. – № 4. – С. 81–95.
3. Альпин Л.М., Великин С.А. Определение анизотропии по измерениям в скважинах // Известия вузов. Геология и разведка. – 1983. – № 12. – С. 97–99.
4. Anderson B., Barber T., Habashy T. The Interpretation and Inversion of Fully Triaxial Induction Data: A Sensitivity Study // Transactions of the SPWLA 43<sup>rd</sup> Annual Logging Symposium. – Oiso, Japan, June 2–5, 2002. – Paper O.
5. Triaxial Induction Applications in Difficult and Unconventional Formations / G. Wang, P. Wu, T. Barber, C. Johnson, D. Allen, A. Kumar, W. Xu, R. Hayden // Transactions of the SPWLA 53<sup>rd</sup> Annual Logging Symposium. – Cartagena, Colombia, June 16–20, 2012. – Paper G.
6. Using Multicomponent Induction Log Data to Enhance Formation Evaluation in Deepwater Reservoirs from Campos Basin, Offshore Brazil / R. Gomes, P. Denicol, A. da Cunha, M. de Souza, B. Kriegshäuser, C. Payne, A. Santos // Transactions of the SPWLA 43<sup>rd</sup> Annual Logging Symposium. – Oiso, Japan, June 2–5, 2002. – Paper N.
7. Каринский А.Д., Красносельских А.А. Моделирование короткого зонда, предназначенного для определения коэффициента электрической анизотропии пород // Геофизика. – 2016. – № 1. – С. 26–33.
8. Arps J. Inductive Resistivity Guard Logging Apparatus Including Toroidal Coils Mounted on a Conductive Stem. US Patent № 3305771; Publ. 21.02.67.

9. Даев Д.С. Об источнике электромагнитного поля при высокочастотных измерениях в скважине // Известия АН СССР. Серия Физика Земли. – 1968. – № 11. – С. 94–95.
10. A New Resistivity Tool for Measurement-While-Drilling / S. Gianzero, R. Chemali, Y. Lin, S. Su, M. Foster // Transactions of the SPWLA 26<sup>th</sup> Annual Logging Symposium. – Dallas, Texas, USA, June 17–20, 1985. – Paper A.
11. Measurements at the Bit: a New Generation of MWD Tools / S. Bonner, T. Burgess, B. Clark, D. Decker, J. Orban, B. Prevedel, M. Luling, J. White // Oilfield Review. – April/July 1993. – P. 44–54.
12. Gianzero S. The Paradox of Anisotropy Revisited // The Log Analyst. – 1999. – V. 40. – № 6. – P. 485–491.
13. Каринский А.Д. Решения прямых задач о поле тороидальной антенны в анизотропной среде // Физика Земли. – 2003. – № 1. – С. 9–20.
14. Каринский А.Д., Мусатов А.А. Определение вертикального сопротивления пластов зондами с тороидальными антеннами при каротаже в процессе бурения // Новые идеи в науках о Земле: Тезисы VI международной конференции. – М., 2003. – Т. 2. – С. 357.
15. Bittar M.S., Hu G. The Effects of Rock Anisotropy on LWD Toroidal Resistivity Sensors // Transactions of the SPWLA 45<sup>th</sup> Annual Logging Symposium. – Noordwijk, the Netherlands, June 6–9, 2004. – Paper WW.
16. New Azimuthal Resistivity and High-Resolution Imager Facilitates Formation Evaluation and Well Placement of Horizontal Slim Boreholes / L. Ortenzi, I. Dubourg, R. van Os, S. Han, R. Koesell, S. Chow Yuk Ha // Petrophysics. – 2012. – V. 53. – № 3. – P. 197–207.
17. Способ измерения удельной электропроводности и электрической макроанизотропии горных пород: пат. Рос. Федерация № 2525149; заявл. 23.04.13; опубл. 10.08.14. – Бюл. № 22. – 9 с.
18. Электромагнитный зонд для каротажа в нефтегазовых скважинах: пат. Рос. Федерация № 2583867; заявл. 20.02.15; опубл. 10.05.16. – Бюл. № 13. – 7 с.
19. Математическое и физическое моделирование сигналов электромагнитного зонда для изучения макроанизотропии осадочных отложений / М.И. Эпов, В.Н. Глинских, В.Н. Еремин, М.Н. Никитенко, А.Н. Петров, И.В. Суродина, И.В. Михайлов // Геомодель 2017: 19-я конференция по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа. – Геленджик, 11–14 сентября 2017. – Статья 43809 (6 с.).
20. Electromagnetic tool for high-resolution logging: theoretical and experimental studies / M.I. Epov, V.N. Glinskikh, V.N. Eremin, M.N. Nikitenko, A.N. Petrov, I.V. Mikhaylov // SPE Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, October 16–18, 2017. – Paper SPE-187904-MS.
21. Совместная численная инверсия данных индукционных и гальванических каротажных зондирований в моделях геологических сред с осевой симметрией / И.В. Михайлов, В.Н. Глинских, М.Н. Никитенко, И.В. Суродина // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 6. – С. 935–947.

Поступила 21.03.2019 г.

#### Информация об авторах

**Эпов М.И.**, доктор технических наук, академик РАН, главный научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Михайлов И.В.**, научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Глинских В.Н.**, доктор физико-математических наук, профессор РАН, заведующий лабораторией многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Никитенко М.Н.**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории многомасштабной геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Суродина И.В.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории вычислительных задач геофизики Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН.

UDC 550.832

## ALGORITHMS OF DATA PROCESSING AND INVERSION FOR AN ELECTROMAGNETIC TOOL WITH TOROIDAL COILS WHEN STUDYING MACROANISOTROPIC PROPERTIES OF RESERVOIRS

Mikhail I. Epov<sup>1</sup>,  
EpovMI@ipgg.sbras.ru

Igor V. Mikhaylov<sup>1</sup>,  
MikhaylovIV@ipgg.sbras.ru

Viacheslav N. Glinskikh<sup>1</sup>,  
GlinskikhVN@ipgg.sbras.ru

Marina N. Nikitenko<sup>1</sup>,  
NikitenkoMN@ipgg.sbras.ru

Irina V. Surodina<sup>2</sup>,  
sur@ommfao1.sccc.ru

<sup>1</sup> A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
3, Koptuyg Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,  
6, Lavrentiev Avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to develop basic algorithms for processing and inversion of data from a new multi-coil multi-frequency multi-mode electromagnetic tool with toroidal coils designed for studying the electrical macroanisotropy of rocks, determining the saturation of reservoirs, identifying thinly bedded sandy-argillaceous oil-saturated intervals and fracture zones.

**The main aim** of the research is to develop basic algorithms for processing and inversion of data from the new electromagnetic tool with toroidal coils for studying the macroanisotropic properties of reservoirs with complex geological structure (thinly bedded, fractured).

**Objects** of the research are the signals of the new electromagnetic tool with toroidal coils.

**Methods:** finite-difference numerical simulation and comparative analysis of signals of the new electromagnetic tool with toroidal coils.

**Results.** The authors have developed the basic algorithms for processing and inversion of data of the new electromagnetic tool with toroidal coils, among which: the algorithms of transforming the signals into the apparent resistivity and electrical anisotropy coefficient, selection of contrasting geoelectric boundaries, as well as software for numerical inversion with determination of the parameters of isotropic and anisotropic formations, taking into account the host medium. The computational algorithms are combined into a single computer program for quantitative interpretation of data from the new electromagnetic tool with toroidal coils. The algorithms are tested on noisy synthetic data. We have shown their efficiency when processing practical data from petroleum boreholes in the Volga-Ural oil and gas province. The investigations demonstrate that the new electromagnetic tool with toroidal coils has a high potential for use in geological sections of complex structure (thin-bedded, fractured).

### Key words:

Geophysical well logging, toroidal coils, electrical resistivity, electrical anisotropy, numerical inversion, complex reservoir, oil saturation.

*The research was supported by the RFBR grant (project no. 19-05-00595).*

### REFERENCES

1. Rytov S.M. Elektromagnitnye svoystva melkosloistoy sredy [Electromagnetic properties of a finely-layered medium]. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki*, 1955, vol. 29, no. 5, pp. 605–616.
2. Alpin L.M. Opredelenie poperechnogo udelnogo soprotivleniya plastov po izmereniyam v skvazhinakh [Determination of transverse resistivity of reservoirs from measurements in wells]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 1978, no. 4, pp. 81–95.
3. Alpin L.M., Velikin S.A. Opredelenie anizotropii po izmereniyam v skvazhinakh [Determination of anisotropy from measurements in wells]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*, 1983, no. 12, pp. 97–99.
4. Anderson B., Barber T., Habashy T. The Interpretation and Inversion of Fully Triaxial Induction Data: A Sensitivity Study. *Transactions of the SPWLA 43<sup>rd</sup> Annual Logging Symposium*. Oiso, Japan, June 2–5, 2002. Paper O.
5. Wang G., Wu P., Barber T., Johnson C., Allen D., Kumar A., Xu W., Hayden R. Triaxial Induction Applications in Difficult and Unconventional Formations. *Transactions of the SPWLA 53<sup>rd</sup> Annual Logging Symposium*. Cartagena, Colombia, June 16–20, 2012. Paper G.
6. Gomes R., Denicol P., da Cunha A., de Souza M., Kriegshäuser B., Payne C., Santos A. Using Multicomponent Induction Log Data to Enhance Formation Evaluation in Deepwater Reservoirs from Campos Basin, Offshore Brasil. *Transactions of the SPWLA 43<sup>rd</sup> Annual Logging Symposium*. Oiso, Japan, June 2–5, 2002. Paper N.
7. Karinsky A.D., Krasnoselskikh A.A. *Modelirovanie karotazhnogo zonda, prednaznachennogo dlya opredeleniya koeffitsienta elektricheskoy anizotropii porod* [Modeling logging tool designed to determine the coefficient of electrical anisotropy of rocks]. *Geofizika*, 2016, no. 1, pp. 26–33.
8. Arps J. *Inductive Resistivity Guard Logging Apparatus Including Toroidal Coils Mounted on a Conductive Stem*. US Patent

- no. 3305771, 1967.
9. Daev D.S. *Ob istochnike elektromagnitnogo polya pri vysokochastotnykh izmereniyakh v skvazhine* [On the source of the electromagnetic field in high-frequency measurements in a well]. *Izv. AN SSSR. Ser. Fizika Zemli*, 1968, no. 11, pp. 94–95.
10. Gianzero S., Chemali R., Lin Y., Su S., Foster M. A New Resistivity Tool for Measurement-While-Drilling. *Transactions of the SPWLA 26<sup>th</sup> Annual Logging Symposium*. Dallas, Texas, USA, June 17–20, 1985. Paper A.
11. Bonner S., Burgess T., Clark B., Decker D., Orban J., Prevedel B., Luling M., White J. Measurements at the Bit: a New Generation of MWD Tools. *Oilfield Review*. April/July 1993. pp. 44–54.
12. Gianzero S. The Paradox of Anisotropy Revisited. *The Log Analyst*, 1999, vol. 40, no. 6, pp. 485–491.
13. Karinsky A.D. Resheniya priamykh zadach o pole toroidalnoy anteny v anizotropnoy srede [Solutions of direct problems on the field of a toroidal antenna in an anisotropic medium]. *Fizika Zemli*, 2003, no. 1, pp. 9–20.
14. Karinsky A.D., Musatov A.A. Opredelenie vertikalnogo soprotivleniya plastov zondami s toroidalnymi antennami pri karotazhe v protsesse bureniya [Determination of vertical resistance of layers by tools with toroidal antennas during logging while drilling]. *Novye idei v naukakh o Zemle. Tezisy VI mezhdunarodnoy konferentsii* [New ideas in earth sciences. Proc. VI International conference]. Moscow, 2003. Vol. 2, pp. 357.
15. Bittar M.S., Hu G. The Effects of Rock Anisotropy on LWD Toroidal Resistivity Sensors. *Transactions of the SPWLA 45<sup>th</sup> Annual Logging Symposium*. Noordwijk, the Netherlands, June 6–9, 2004. Paper WW.
16. Ortenzi L., Dubourg I., van Os R., Han S., Koepsell R., Chow Yuk Ha S. New Azimuthal Resistivity and High-Resolution Imager Facilitates Formation Evaluation and Well Placement of Horizontal Slim Boreholes. *Petrophysics*, 2012, vol. 53, no. 3, pp. 197–207.
17. Epov M.I., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N. *Sposob izmereniya udelnoy electroprovodnosti i electriceskoy makroanizotropii gornykh porod* [The way to determine specific conductivity and electrical macroanisotropy of rocks]. Patent RF, no. 2525149, 2014.
18. Epov M.I., Eremin V.N., Petrov A.N., Glinskikh V.N. *Electromagnitny zond dlya karotazha v neftegazovykh skvazhinakh* [Electromagnetic tool for logging in oil and gas wells]. Patent RF, no. 2583867, 2016.
19. Epov M.I., Glinskikh V.N., Eremin V.N., Nikitenko M.N., Petrov A.N., Surodina I.V., Mikhaylov I.V. Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie signalov elektromagnitnogo zonda dlya izucheniya makroanizotropii osadochnykh otlozheniy [Mathematical and physical simulation of responses of an electromagnetic logging tool for studying macroanisotropy of sedimentary deposits]. *Geomodel 2017, 19-ya konferentsiya po voprosam geologorazvedki i razrabotki mestorozhdeniy nefti i gaza* [Geomodel 2017. 19 conference in issues of geoexploration and development of oil and gas deposits]. Gelendzhik, 11–14 September 2017. Paper 43809 (6 p.).
20. Epov M.I., Glinskikh V.N., Eremin V.N., Nikitenko M.N., Petrov A.N., Mikhaylov I.V. *Electromagnetic tool for high-resolution logging: theoretical and experimental studies. SPE Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, October 16–18, 2017. Paper SPE-187904-MS.
21. Mikhaylov I.V., Glinskikh V.N., Nikitenko M.N., Surodina I.V. Joint inversion of induction and galvanic logging data in axisymmetric geological models. *Russian Geology and Geophysics*, 2017, vol. 58, no. 6, pp. 752–762.

Received: 21 March 2019.

#### Information about the authors

**Mikhail I. Epov**, Dr. Sc., RAS Academician, principal researcher, A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

**Igor V. Mikhaylov**, researcher, A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

**Viacheslav N. Glinskikh**, Dr. Sc., RAS Professor, head of laboratory of Multiscale Geophysics, A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

**Marina N. Nikitenko**, Cand. Sc., senior researcher, A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

**Irina V. Surodina**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS.

УДК 550.832, 550.834.05

## ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРЕЩИНОВАТОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ

Орехов Александр Николаевич<sup>1</sup>,  
orekhovan@mail.tomsknet.ru

Амани Мангуа Марк М<sup>1</sup>,  
mangouam@yahoo.fr

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 635050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Приводятся результаты анализа российских и зарубежных публикаций, выполненного с целью характеристики современного состояния вопроса применения геофизических методов для прогнозирования трещиноватости коллекторов. Дано описание особенностей возникновения трещиноватости в зависимости от её генезиса. Описаны тектонические и геологические условия трещинообразования. Приведена геологическая модель образования трещин. Показана связь между трещинами и разломами. Охарактеризованы методы, позволяющие изучить трещиноватость как в скважине (методы геофизических исследований скважин), так и с поверхности (по результатам сейсморазведочных работ). Указаны наиболее востребованных для решения этих задач сейсмические атрибуты. Приведена характеристика используемых методов ГИС и определён круг решаемых задач как для наиболее широко распространённых вариантов геофизических исследований скважин, так и для инновационных методов, предлагаемых компанией «Шлюмберже». Сделан вывод о необходимости комплексирования методов ГИС. Описаны физические основы сейсмических методов изучения трещиноватости и основные атрибуты. Отмечены их возможности и ограничения. И на этой основе очерчен круг вопросов, требующих дополнительного изучения.

**Целью** исследования является определение направлений дальнейших исследований для повышения эффективности геофизических работ при изучении трещинных коллекторов путём создания обзора геофизических методов, применяемых для выделения зон повышения трещин, последующего анализа существующих методик и определения оптимальных путей решения этих задач.

**Результаты.** Проанализированы геофизические методы выявления трещиноватых коллекторов (как методы ГИС, так и сейсмические атрибуты). Определён круг нерешённых задач. Намечено направление дальнейших исследований.

### Ключевые слова:

Коллектор, трещинно-кавернозные тип, сейсмические атрибуты, геофизические методы исследования скважин.

### Введение

В нефтепромысловой отрасли специалисты по геологии разрабатывают технологии изучения объекта исходя из характеристик пластов. Одно из наиболее широко используемых определений предложено Т. Ван Голф-Рахтом. По его мнению, под «геолого-геофизической характеристикой пласта, понимается совокупность исходной информации о породах, слагающих пласт и насыщающих их флюидами» [1]. Для того чтобы изучать трещиноватость коллекторов, необходимо знать условия формирования и физические характеристики исследуемых резервуаров. Соответственно, для формирования оптимального комплекса геофизических методов, используемых для прогноза трещинно-кавернозных коллекторов, нужно учитывать параметры и условия их трещинообразования.

Трещиноватость горных пород – один из самых важных геологических параметров трещиноватых коллекторов. Она определяет пространство (т. н. вторичная пористость для коллекторов) [2]. Так как трещинные коллекторы отличаются от обычных поровых коллекторов, необходимо учитывать их особенности. Для лучшего понимания сути вопроса кратко охарактеризуем современные представления о теории трещинообразования и на её основе обоснуем характерные черты трещинных

коллекторов и возможности геофизических методов для выделения таких коллекторов.

Трещина, при сегодняшнем состоянии изучения вопроса, определяется как некая поверхность, сопряжённая с нарушением сплошности или потери сцепления материала (горной породы) [1]. Таким образом, разрывом называется процесс по потере сцепления горной породы. Результатом этого процесса и является возникновение трещины как таковой [1, 3–5]. В зависимости от наличия или отсутствия смещения пород по образовавшейся трещине она может представлять собой либо разлом (нарушение) – в случае определяемых смещений пород вне зависимости от их направления, либо просто трещину (макротрещину) – если смещение не установлено [1]. Соответственно можно говорить о том, что причиной возникновения трещин является нарушение сплошности пласта. При этом возникают различные блоки, разделённые трещинами, сплошность пород нарушается. Однако какие-либо смещения этих блоков не определяют.

**Происхождение трещин.** При изучении осадочных пород применение вышеприведённого определения разрыва может оказаться проблематичным [3, 6, 7]. Причину этого следует искать в тесной связи геологической обстановки и степени трещиноватости пород.

**Тектонические условия.** Одним из наиболее существенных вопросов, которые требуют исследования при решении вопросов происхождения трещин, а также при характеристике их связи со структурными и тектоническими условиями, является вопрос оценки интенсивности распространения трещин. Не менее значимой представляется и задача определения степени влияния трещин на формирование ловушек углеводородов.

По мнению М. Фридмана и Д. Стирнса [5, 8] основными типами трещин являются:

- трещины, возникшие в процессе складкообразования (генетически с ним связанные);
- региональные трещины, образование которых, как правило, связано с формированием локальных структур.

С ними не вполне согласен Дж. Хадсон [1, 9]. Он проводил исследования на территории Аризоны и Юты. Полученные результаты показали, что, скорее всего, плоскости сочленения в пластах и трещины образовывались на ранних этапах седиментогенеза. А основной причиной их возникновения являлись усталостные деформации, обусловленные приливо-отливными напряжениями.

Изучая осадки Сиднейского бассейна, А. Кук [10] выяснил, что разрозненные трещины, сформировавшиеся в процессе седиментогенеза, могут иметь весьма длительный период существования, сохраняясь, в том числе, и на этапах захоронения и консолидации осадков. Этот вывод ставит под сомнение ранее высказанное суждение С. Прайса [1, 9] о малой вероятности существования в молодых осадках долгоживущих разрозненных трещин. По его мнению, в ходе процесса уплотнения осадков, а особенно их последующего диагенеза, ранее образовавшиеся трещины должны залечиваться.

Результаты полевых наблюдений позволили П. Харрису предложить свой вариант типизации трещин. Он считает, что существует два основных типа трещин:

«а) трещины, которые связаны с геометрией структуры коллектора. Они имеют постоянную ориентацию и упорядоченную систему распространения на всей площади наблюдений. Данная связь трещин со структурой является особенностью локальных участков доскладчатого периода;

б) трещины, которые не связаны с геометрией структуры коллектора. Это трещины, включающие неправильные или изогнутые разрывы при отсутствии какой-либо закономерности в их ориентации. Такие трещины связаны с различными поверхностными явлениями (оползнями, оседанием пластов под действием силы тяжести и т. д.)» [1].

**Геологические условия трещинообразования.** Как правило, трещинные коллекторы типичны для хрупких пород, характеризующихся пониженной пористостью и залегающих в сейсмически активных регионах с повышенной частотой проявления тектонических процессов [11, 12]. Возни-

кающие в этих условиях трещины имеют сравнительно большие геометрические размеры, причём как по ширине, так и по протяжённости, и их часто называют макротрещинами.

Если же для исходной породы характерны несколько повышенные пластичность и пористость (речь в данном случае идёт о межгранулярной пористости), трещины имеют небольшие геометрические размеры. «Раскрытость» таких трещин тоже ниже. По своему генезису они являются трещинами разрыва. А по размерам – микротрещинами.

Кроме того, имеют место случаи, когда трещины возникают не как следствие разнонаправленных тектонических напряжений, а в результате уменьшения сцепления частиц породы. Такую реакцию породы может вызывать целый ряд причин, а именно:

- остывание эффузивных (и интрузивных) пород всегда сопровождается уменьшением их объёма;
- процесс складкообразования, за счёт увеличенных напряжений в замковых частях складок, приводит к ослаблению сцепления зёрен пород на этих участках;
- высыхание пород, содержащих глинистые минералы, приводит к их (пород) растрескиванию вследствие уменьшения объёма за счёт потери воды;
- процессы денудации, в ходе которых, за счёт эрозии мощность перекрывающих отложений становится различной в разных частях среды. Это приводит к формированию различных напряжений по ослабленным зонам.

**Геологическая модель трещинообразования.** Известно несколько моделей формирования трещин. Охарактеризуем основные.

Базовой моделью образования трещин является модель Киблье [12]. Она предполагает расчёт карт равной вероятности развития трещин и выявление на основе их анализа участков наибольшей вероятности трещинообразования. Суть этой модели состоит в следующем. Предполагается, что по результатам седиментогенеза были сформированы плоские слои осадочных горных пород, примерно повторяющие форму нижележащих отложений. Далее к ним были приложены тектонические напряжения (в ходе процессов складкообразования) и горное давление (как результат гравитационного воздействия вышележащих отложений). Это суммарное воздействие и привело, в конечном итоге, к возникновению сети трещин. Таким образом, если мы проанализируем современную форму пластов и рассчитаем критический модуль упругости в каждой точке среды, мы получим возможность оценить вероятность возникновения трещин при предполагаемых смещениях. При этом надо иметь в виду, что вероятность трещинообразования повышается при уменьшении критического модуля упругости.

Л. Рамстад [1, 12] развил идею Киблье. При этом он показал, что использованный ранее метод моделирования являлся не совсем удачным и пред-

ложил использовать метод конечных элементов. Ключевым условием его применимости является соблюдение закона линейности для горных пород, которые (в первом приближении и в зависимости от состава) можно отождествлять с упругими и упруго-вязко-пластичными материалами.

#### Связь между трещинами и разломами

**Тектонические трещины** в горных породах встречаются значительно чаще разломов. Причиной их возникновения являются главным образом напряжения, появляющиеся на этапах тектогенеза. Они, с одной стороны, могут быть связаны с различными локальными тектоническими структурами, такими как разломы, складки, а с другой – возникать в ходе напряжений, связанных, например, с движением литосферных плит. Таким образом, можно говорить о том, что природа тектонических трещин разнообразна и их возникновение может быть обусловлено различными источниками напряжений, что приводит к формированию трещин различных масштабов. Большинство исследователей в настоящее время выделяют три основные последовательные стадии деформации, приводящие к появлению тектонических трещин, как это показано на рис. 1 [6–8, 13].

1. **Стадия упругой деформации.** Деформации этой стадии не приводят к разрушениям пород. При снятии нагрузки порода восстанавливает изначальные геометрические характеристики. Таким образом, можно говорить о том, что деформации этой стадии являются обратимыми.
2. **Стадия пластической деформации.** В случае превышения тектоническими напряжениями порога обратимости (предела упругости) порода безвозвратно изменит свои геометрические характеристики. Деформации этой стадии приводят к образованию складок, но не приводят к нарушению сплошности пород. Необходимым условием формирования деформаций этой стадии является не превышение тектоническими напряжениями предела прочности пород.

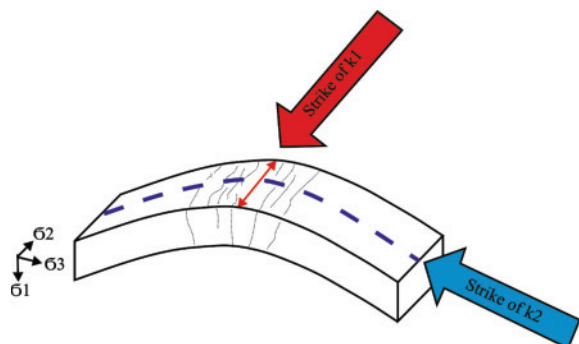


Рис. 1. Пример ориентации напряжения с направлением трещин [14]

Fig. 1. Example of stress orientation with fracture direction [14]

3. **Стадия хрупкой или разрывной деформации.** Как правило, это заключительная стадия де-

формации пород под действием тектонических сил. Деформации этой стадии возникают тогда, когда порода ведёт себя как хрупкое тело. То есть когда тектонические напряжения существенно превышают все пределы сопротивляемости породы. Это приводит к появлению т. н. «хрупких» деформаций, связанных с потерей сплошности и формированием различных тектонических трещин.

#### Обнаружение зон повышенной трещиноватости

**Прямая оценка трещиноватости.** Исследования керна – это наиболее достоверный метод в изучении трещиноватости коллекторов. Но при бурении горные породы деформируются, происходит разгрузка напряженных состояний, вследствие чего образуются новые (техногенные) трещины и изменяется апертура ранее существовавших трещин. Кроме того, радиус исследований у подобных методов незначительно превышает радиус скважины.

#### Скважинные методы.

К ним относятся:

Гидродинамические исследования скважин, которые позволяют оценить расстояние от скважины до зон повышения трещиноватости. Гидропрослушивание скважин и трассерные исследования позволяют выделить преимущественные направления фильтрации. Также можно изучать трещиноватость на обнажениях, где имеется возможность наблюдать распространение трещин и их взаимодействие на значительной площади. Необходимо иметь в виду, что только вышеописанных исследований недостаточно для достоверного определения распределения сети трещин в породоколлекторе.

**Применение методов геофизических исследований скважин.** Попытки найти способ прямого выделения трещиноватости, а также оценки пространственной плотности трещиноватости предпринимались уже давно. Со второй половины прошлого века для решения этих задач активно пытались использовать данные ГИС [15, 16]. Однако однозначного решения этой проблемы не получено до сих пор. В основном это обусловлено сложностями выделения трещин. Так, например, оказалось, что задача описания системы трещин в стволе скважины весьма сложна и это нельзя сделать однозначно верно. В силу этих причин решение проблемы, как это обычно принято в геофизике, стали искать в комплексировании методов каротажа.

Дадим краткую характеристику наиболее востребованных при изучении трещиноватости методов ГИС.

**Метод самопроизвольной поляризации (СП).** Измеряемым параметром в этом методе является разность потенциалов между неподвижным электродом, расположенным на поверхности, и подвижным электродом, перемещаемым по стволу скважины. Если в скважине встречаются проницаемые породы, то значение СП меняется и отклоняется от уровня фона (линии глин). Причём это яв-

ление возникает в случае наличия и пористых, и и трещиноватых пород. Определение природы аномалий – пористость или трещиноватость – возможно исходя из анализа геологических характеристик разреза [17, 18].

Причиной возникновения отрицательных аномалий СП является повышение степени фильтруемости бурового раствора. Таким образом, можно говорить, что для случая развития трещиноватости эти аномалии имеют фильтрационную природу. Однако, в силу того, что такие же аномалии возникают и за счёт окислительно-восстановительных процессов при наличии в породе и в трещинах пирита и др., этот факт, а также то, что в карбонатах данный метод не работает, заставляет с осторожностью относиться к результатам выделения трещин с его помощью, заставляет использовать его только в комплексе.

**Гамма-метод.** Уровень естественной радиоактивности сам по себе никак не связан со степенью трещиноватости пород. Однако он однозначно связан с количеством глины (как хорошего сорбента ЕРЭ) в среде. Также на уровень концентрации ЕРЭ в среде влияет и количество сорбированных на скелете горной породы радиоактивных минералов, попавших туда в силу фильтрации воды по трещинам [18, 19]. Поэтому при определённых условиях повышение естественной радиоактивности по данным гамма каротажа может служить достоверным признаком наличия повышенной трещиноватости.

**Кавернометрия.** Применение этого метода ГИС для прогноза трещиноватости основывается на том, что в силу более высокого давления бурового раствора (по сравнению с пластовым давлением) в зонах повышенной трещиноватости происходит ускоренное формирование глинистой корки, за счёт «задавливания» бурового раствора в горную породу. В этом случае по результатам кавернометрии фиксируется уменьшение диаметра скважины. Естественно, что данная методика работает только при бурении на глинистых растворах либо на растворах со специальными добавками.

**Термометрия.** Применение этого метода ГИС для определения степени трещиноватости основано на том, что существует разница между температурой бурового раствора (как правило, он холоднее) и горной среды [15, 16]. При циркуляции раствора в скважине наиболее значимо температура будет понижаться напротив проницаемой (трещиноватой) части разреза, которая, таким образом, может быть зафиксирована чувствительными скважинными термометрами, обладающими низкой тепловой инерцией и хорошей чувствительностью.

**Наклонометрия.** Принцип использования этого метода для определения трещиноватости основан на том факте, что проницаемая зона характеризуется несколько повышенной проводимостью [15, 16]. При измерении сопротивления в процессе вращения зонда на каждом из четырёх башмаков при благоприятных условиях можно зафиксиро-

вать разнонаправленные трещины, которые должны проявиться, как было отмечено выше, понижение сопротивления, по сравнению со сплошной средой.

**Методы ГИС для определения пустотности.** Как правило, в эту группу включаются акустический, нейтронный и плотностной каротаж, которые позволяют, с одной стороны, оценивать трещиноватость, а с другой, при благоприятных условиях, фиксировать наличие вторичной пустотности (акустический каротаж) [16, 19].

**Акустический метод.** Физической основой его применения для оценки трещиноватости и вторичной пустотности является наличие теоретической связи между их наличием и особенностями распространения в среде упругих волн. Несмотря на очевидную связь между этими параметрами, полученные практические результаты в настоящее время не столь однозначны. Однако большинство специалистов [20, 21] считает именно этот метод наиболее перспективным для применения в дальнейшем в качестве основного метода ГИС для регистрации трещиноватости.

К его основным достоинствам можно отнести возможность уверенного разделения пород по их акустическим свойствам и сравнительно невысокую чувствительность к неоднородностям ствола скважины.

**Плотностной метод.** Физической основой применения плотностного метода для определения трещиноватости служит очевидная связь между трещиноватостью (пористостью) и плотностью [15, 19]. Чем выше трещиноватость, тем ниже плотность, что проявляется в увеличении скорости счёта. Основные ограничения в применении этого метода ГИС связаны с тем, что зонд не ориентирован и не вращается. В силу этих ограничений, может оказаться, что трещиноватость будет установлена только с одной стороны ствола скважины.

К преимуществам плотностного метода [18] можно отнести возможность количественного определения величины пустотности.

**Нейтронные методы.** Нейтронный каротаж, так же как и плотностной, позволяет измерять общую пустотность [15–17, 19]. Для него характерны те же недостатки и ограничения, что и для плотностного каротажа. Однако, в отличие от последнего, нейтронные методы (за счёт фиксации повышенного содержания водорода в породе) позволяют более уверенно фиксировать открытые трещины.

**Скважинный телевизор.** При использовании скважинного акустического телевизора (САТ) оператор получает акустическую развёртку ствола скважины, где трещинам, кавернам, пустотам и другим нарушениям сплошности пород в явном виде соответствуют участки изменения интенсивности волновой картины. Метод характеризуется весьма высокой разрешающей способностью и в ряде случаев может помочь отказаться от непрерывного отбора керна.

Считается, что этот метод является единственным прямым методом изучения трещиноватости в открытом стволе. Также необходимо отметить, что достоверность получаемых при использовании САТ результатов можно повысить при использовании керновых данных.

Отдельно надо остановиться на современных методах выделения трещин, предлагаемых компанией «Шлюмберже».

*Sonic Scanner: 3D акустическое зондирование* [22]. Широкий частотный спектр излучателей, используемых в платформе Sonic Scanner, позволяет регистрировать волновые поля с высоким отношением сигнал/шум независимо от интервального времени распространения волн в породе, что устраняет необходимость многократных рейсов. Увеличенная, по сравнению с обычными акустическими приборами, антенна приемников, которая состоит из 13 станций по 8 азимутальных приемников в каждой, и большой диапазон расстояний между монополярными излучателями и приемниками позволяют получать радиальный профиль изменения интервального времени распространения продольной волны по мере удаления от стенки скважины вглубь пласта. Аналогичный профиль для поперечной волны получают благодаря зависимости глубинности измерения изгибной волны от частоты сигнала посредством инверсии ее дисперсионной кривой. Получаемые полевые данные позволяют провести классификацию анизотропии пласта, определить её тип и характер.

*FMI (азимутальный электрический микроимиджер)*. Ещё одной методикой, предложенной компанией «Шлюмберже» для изучения трещиноватости в стволе скважины, является использование азимутального электрического микроимиджера [23]. Он обладает достаточно высоким разрешением (не более 5 мм по вертикали и горизонтали) и позволяет работать в заполненных буровым раствором на водной основе скважинах, что делает его чрезвычайно полезным. Однако в случае использования полимерных растворов эффективность этого метода существенно снижается.

*Quanta Geo (азимутальный электромагнитный микроимиджер)* [24]. Эта аппаратура используется для проведения структурного анализа, оценки естественной и техногенной трещиноватости пород, оценки вторичной пористости кавернопоровых карбонатных коллекторов, уточнения эффективной мощности коллекторов в условиях тонкого переслаивания песчано-глинистых отложений, оценки азимута максимального горизонтального напряжения, проведения седиментологического анализа, высокоточной привязки керна по глубине (точность составляет 3–5 см), азимутального ориентирования керна. В зависимости от геолого-технологических условий измерений применяются электрические, электромагнитные или ультразвуковые пластовые микроимиджеры.

*OBMI (Азимутальный электромагнитный микроимиджер)* [25]. В геологической интерпрета-

ции имиджи используются для определения внутрипластовой слоистости и текстурных особенностей породы, причем размер отдельно взятых элементов может не превышать 1 см (0,4 дюйма). Отмечены также наблюдения на имиджах открытых и залеченных трещин, размер которых менее 1 см.

*UBI (ультразвуковой высокоразрешающий микроимиджер)* [26] Он позволяет получать характеризующиеся высоким разрешением акустические изображения (имиджи) ствола скважины, заполненного буровым раствором на водной или нефтяной основе. Имиджи позволяют определять наклонные пласты, трещины и другие элементы залегания пластов, вскрытых скважиной. Точные измерения сечения ствола скважины позволяют сделать выводы о стабильности стенок скважины и овальности ствола.

Тем не менее необходимо признать, что даже эти методики, взятые по отдельности, не дают возможности однозначного выделения трещин и оценки трещиноватости коллекторов в целом.

**Комплексирование методов ГИС.** Как было отмечено выше, при изучении трещиноватости в стволе скважины мы сталкиваемся с проблемой, типичной для геофизики в целом, а именно – практически ни один метод ГИС (возможно за исключением САТ) не может картировать её в моноварианте. Соответственно, решение этой проблемы такое же, как и для других задач, стоящих перед геофизическими методами, а именно – комплексирование [16, 27]. Таким образом, эффективность решения задач выделения трещин в стволе скважины напрямую зависит от качества формирования поискового комплекса ГИС.

Как показывают вышеприведённые результаты анализа современных способов определения трещиноватости, исследования в стволе скважины, они всё-таки позволяют с определённой долей уверенности (которая резко повышается в случае использования скважинного телевизора) выделять трещины и оценивать трещиноватость коллекторов. Однако этого нельзя сказать о способах оценки трещиноватости при проведении полевых геофизических (сейсморазведочных) работ. Необходимо иметь в виду, что возможность оценки трещиноватости на этом этапе позволит существенно повысить достоверность прогноза коллектора и, как следствие, эффективность геофизических работ в целом.

**Обнаружение и зон повышенной трещиноватости. Сейсмические методы.** Сейсмические исследования должны позволить значительно снизить неопределённость при оценке трещиноватости. Несравненный плюс таких исследований заключается в том, что современная трёхмерная (3D) сейсмическая съёмка равномерно охватывает значительную площадь над месторождением, независимо от неравномерно расположенных на площади скважин [27, 28].

По сейсмическим материалам сложно сказать, сколько именно трещин находится в пласте и ка-

кова пространственная ориентация каждой из них, но можно выделить зоны повышенной трещиноватости и попытаться определить их преимущественную азимутальную ориентировку.

#### Физические основы для выделения трещин по сейсмическим данным

Анализируя характеристики упругих волн в зонах трещиноватости, можно сделать вывод, что наиболее чувствительными являются динамические параметры продольной и поперечной волны [20], а именно – амплитуда, затухание и энергия (рис. 2). Весьма чувствительны к зонам трещиноватости (в связи с их высокой проницаемостью) являются параметры волн Стоунли–Лэмба. На приведённом рисунке хорошо видно, что области с изменёнными характеристиками (спектр и форма) акустического сигнала соответствуют зонам повышенной трещиноватости. Это же уверенно фиксируется и при анализе фазовой корреляции (а имен-

но – в виде областей её нарушения, особенно в области поперечных волн) и волновой картине (падение амплитуд практически всех волн).

#### Направления развития сейсморазведки при картировании зон повышенной трещиноватости

**Азимутальный анализ амплитуд Р- и S-волн.** S. Crampin, V. Grechka, H.B. Lynn и другие [29–34] предлагают технологии азимутального анализа амплитуд (AVAZ), основанные на азимутальной анизотропии Р- и S-волн, для изучения зон повышенной трещиноватости.

**Анализ атрибутов волнового поля.** Эта технология анализа сейсмических данных на сегодняшний день считается одной из наиболее перспективных, как отмечается в работах [2, 35–45]. Но при этом она же является и одной из наименее разработанных. Сейсмические атрибуты являются наиболее распространёнными и общедоступными, каждый из них подчёркивает определённую характе-

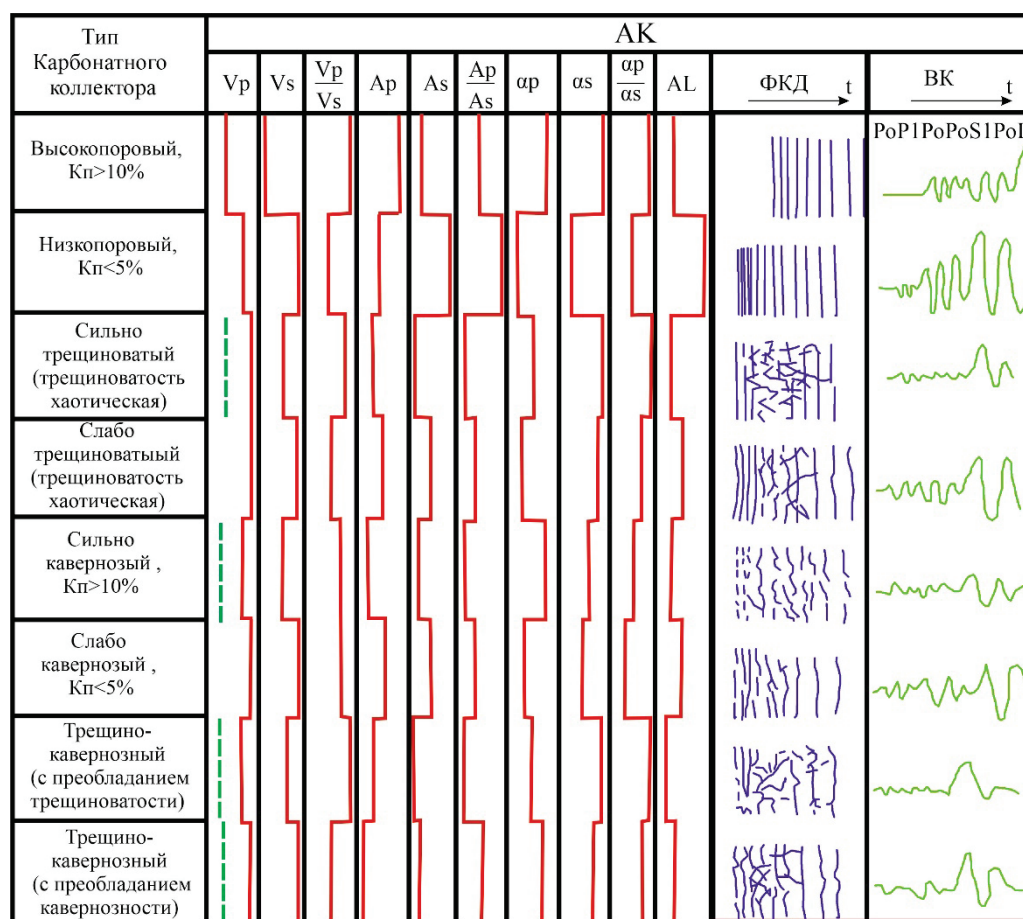


Рис. 2. Обобщенная схема изменения акустических параметров в разрезе, представленном чередованием пластов с различным типом пустотного пространства [20]:  $K_p$  – коэффициент пористости;  $V_p$  – скорость продольной волны;  $V_s$  – скорость поперечной волны;  $A_p$  – амплитуда продольной волны;  $A_s$  – амплитуда поперечной волны;  $a_p$  – коэффициент затухания продольной волны;  $a_s$  – коэффициент затухания поперечной волны;  $AL$  – амплитуда волн Стоунли–Лэмба; ФКД – фазовая корреляция диаграмм; БК – волновая картина

Fig. 2. Generalized scheme for changing acoustic parameters in a section represented by alternation of strata with different types of porosity [20]:  $K_p$  – coefficient of porosity;  $V_p$  – velocity of the longitudinal wave;  $V_s$  – transverse wave velocity;  $A_p$  – amplitude of the longitudinal wave;  $A_s$  – amplitude of the transverse wave;  $a_p$  – attenuation coefficient of the longitudinal wave;  $a_s$  – shear attenuation coefficient;  $AL$  – amplitude of the Stoneley–Lamb waves; ФКД – phase correlation of diagrams; БК – wave pattern

ристику волнового поля, связанную с трещинами. На практике анализ сейсмических атрибутов широко применяется при поиске месторождений углеводородов, оценке структуры, определении соли, обнаружении структурных несогласий. Также он позволяет определить ориентацию структуры, может выступать как индикатор трещин. Дополнительно этот метод даёт возможность выделять русла, характеризовать текстуры, определять наличие карбонатов в разрезе, выступать в роли индикатора литологии и углеводородов, прогнозировать коллектор, его петрофизические свойства. Полученные данные могут быть использованы при моделировании резервуара. С методической точки зрения, результаты анализа атрибутов волнового поля могут быть использованы для уменения шума. Однако особую актуальность анализ сейсмических атрибутов приобретает в случаях локализации коллекторов в карбонатных и терригенных разрезах в ловушках основных типов. В условиях сложных коллекторов, трещиноватых в Западной Сибири, анализ сейсмических атрибутов играют важную роль в процессе картирования, выделения разломов и прогнозирования продуктивности коллекторов [46].

Наиболее распространёнными и общедоступными атрибутами для решения этой задачи (*картирования зон повышенной трещиноватости*) являются геометрические атрибуты, преимущественно направлены на анализ геометрии сейсмического горизонта, что является прямым признаком наличия трещиноватости. К геометрическим атрибутам относится большая часть всех применяющихся на практике методов. Наиболее информативные из них следующие:

*Кривизна* – является мерой структурной деформации, анализирует форму сейсмического горизонта и показывает, насколько он изогнут в некоторой точке. Атрибуты кривизны начали активно использоваться для предсказания малоамплитудных разрывных нарушений и зон трещиноватости с тех пор, как была продемонстрирована корреляция значений кривизны с разрывными нарушениями [47]. По мнению авторов работы [14, 47, 48], кривизна – превосходная мера палеодеформаций, приводящих к растрескиванию пород. Данный атрибут позволяет не только картировать трещиноватые зоны, но и судить о плотности трещин. Связь кривизны с плотностью трещин базируется на следующих трех предположениях: порода хрупкая и поэтому подвержена трещинообразованию; рост кривизны предполагает рост напряжения; рост напряжения предполагает рост плотности трещин. Разработка основ вычисления кривизны по сейсмическим данным выполнена S.Chopra и K. Marfurt [48] и предполагает вычисление искомым параметров только вдоль отражающих горизонтов. Несмотря на ряд практических положительных примеров использования так называемой погоризонтной кривизны, она содержит ряд недостатков [14]. Многими авторами [14, 47] было показано, что различные меры кривизны (*кривизна азимут, средняя кривизна, максимальная кривизна K<sub>max</sub>, минимальная кривизна K<sub>min</sub>, Гауссова кривизна* и т. д.) имеют высокую корреляцию с разрывными нарушениями, но информативными для картирования тектонической нарушенности являются наибольшие положительная и отрицательная кривизны.

*Когерентность (Дисперсия)* позволяет выделить несоответствие сигнала по латерали и указы-

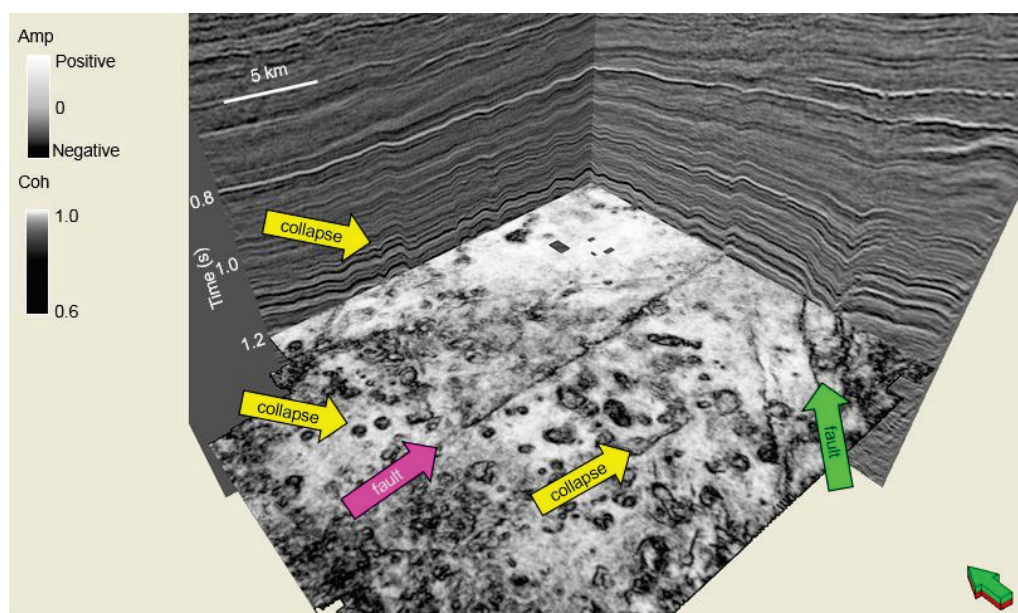


Рис. 3. Пример использования среза куба когерентности времени при  $t=1,2$  с на горизонте для выделения разломов и трещиноватых зон [41, 42]

Fig. 3. Example of using slice of time coherence cube at  $t=1,2$  s on the horizon to isolate faults and fissured zones [41, 42]

ваит на неоднородности вследствие зон разломов, трещин и разрывных нарушений, как это показано на рис. 3. Коэффициент когерентности впервые введен в 1930 г. американским математиком Норбертом Винером. С тех пор концепция, положенная в основу этого атрибута, была успешно адаптирована для применения в различных областях знаний. По данным различных авторов [11, 40, 45, 49] этот атрибут успешно применяется в том или ином виде в сейсморазведке при выявлении и картировании перечисленных стратиграфических и структурных перерывов.

В первых работах по данному направлению [14, 47, 48] был предложен способ расчёта т. н. «мгновенной» когерентности. Для этого использовался набор сейсмотрасс и единый отсчёт времени. Далее этот подход был усовершенствован [12] применительно к понятию аналитического сигнала (оггибающей) сейсмической трассы. Для расчета мгновенной когерентности указанные авторы использовали сейсмограммы ОСТ (общей срединной точки), которые предварительно были исправлены путём введения статических и кинематических поправок, что давало возможность выравнивания сигнала.

По состоянию на сегодняшний день для расчётов используются уже т. н. «окончателные сейсмические изображения». Это дало возможность оптимизировать алгоритм расчётов таким образом, что стало возможным как существенное сокращение времени вычислений, так и получение более устойчивых результатов по причине улучшения отношения сигнал–помеха и возможности использования более протяжённых временных интервалов.

В работе [35] авторы для расчета когерентности предложили использовать функцию взаимной корреляции смежных сейсмических трасс. Затем было предложено использовать коэффициент подобия [42] и собственные значения корреляционной матрицы [41]. Все эти подходы затем были адаптированы к учету наклона отражающих границ [41]. Позднее эти алгоритмы были заменены методиками расчёта с использованием статистик высокого порядка вкупе с объединением смежных сейсмотрасс в т. н. «супертрассу», локальную структурную энтропию, а также сканированием наклонов отражённых волн.

Атрибут *Ant-Tracking*, запатентованный компанией Шлюмберже [50], особо ценится за технологию прослеживания разрывных нарушений, зон высокой плотности трещин и коридоров трещиноватости. Метод включает в себя нейронные сети с обучением для создания синергетического искусственного интеллекта на основе поведения колонии муравьев, что имитирует движение потока флюида по трещинам.

### Заключение

Наиболее точным способом для обнаружения зон повышенной трещиноватости считаются скважинные измерения. Главным их недостатком является малый радиус исследования и невозможность использования на этапе прогнозирования коллектора по результатам полевых геофизических работ. Существующие методы выделения трещиноватости по сейсмическим методам являются достаточно точными, но косвенными. Это вызвано тем, что множество других явлений, например, зоны выклиниваний, литологические замещения, да

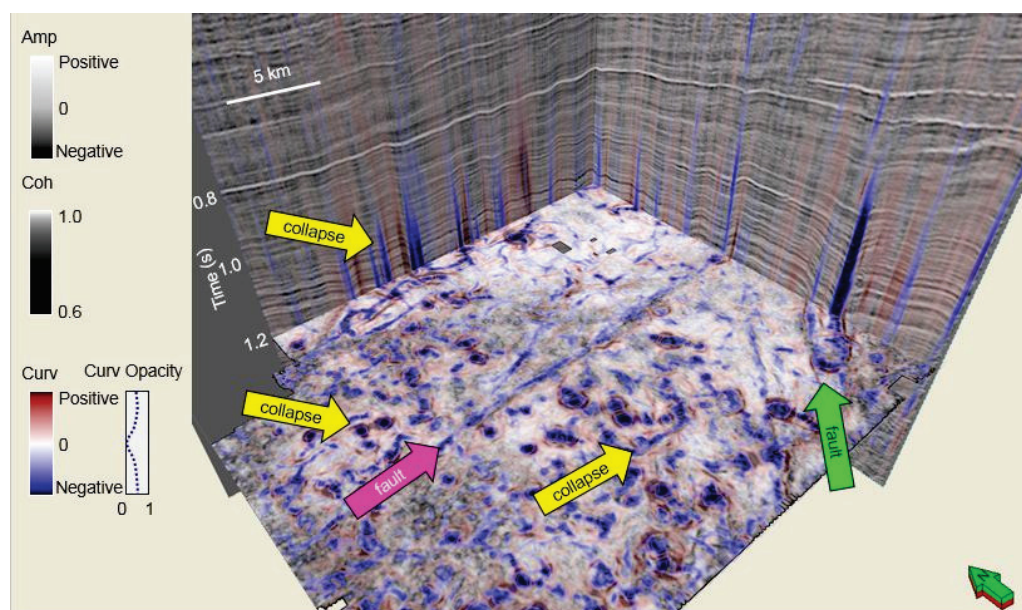


Рис. 4. Пример комплексирования трех сейсмических атрибутов (наиболее положительная кривизна,  $k_1$ , и наибольшая отрицательная кривизна,  $k_2$ , и когерентность) на горизонте для выделения разломов и трещиноватых зон [41, 42]

Fig. 4. Example of using slice of the most-positive and most-negative principal curvatures and coherency time slice at  $t=1,2$  s to isolate faults and fissured zones [41, 42]

и просто артефакты, связанные с проведением полевых сейсморазведочных работ, дают сейсмический отклик, сравнимый с откликом от трещиноватости. Для наиболее полного понимания распространения трещиноватости в исследуемой породе недостаточно только сейсмических данных, необходимо комплексирование сейсморазведки с результатами других исследований, содержащих информацию о трещинах. Очевидно, что использование в прогностических целях одного (любого) сейсмического атрибута неизбежно приведёт к получению недостаточно достоверных результатов. Поэтому, на наш взгляд, наиболее перспективным направлением исследований в этой области является интеграция (комплексирование) нескольких атрибутов, как это показано на рис. 4. Очевидно, что при таком подходе повышаются достоверность и детальность оценки зон с интенсивно развитой трещиноватостью. По на-

шему мнению, целесообразно комплексирование как минимум двух способов оценки интенсивности развития трещин, например, анализ ГИС и анализ сейсмических атрибутов.

Таким образом, очевидна необходимость дальнейшего изучения информативности сейсмических атрибутов с целью поиска путей повышения эффективности методик выделения трещиноватости. Эффективность сейсмического атрибутного анализа сегодня не вызывает вопросов. При этом остаются слабо изученными вопросы выбора атрибутов, наиболее подходящих для изучения трещиноватости и методик их анализа.

Также слабо исследованы вопросы их комплексирования для решения конкретных задач, они по-прежнему достаточно часто решаются на интуитивном уровне и требуют дальнейшего углублённого изучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван Голф-Рахт Т.Д. Основы нефтепромысловой геологии и разработки трещиноватых коллекторов // пер. с англ. Н.А. Бардиной, П.К. Голованова, В.В. Власенко, В.В. Покровского // под ред. А.Г. Ковалева. – М.: Недра, 1986. – 607 с.
2. Молодовский В.А., Поздняков В.А., Матросов К.О. Картирование особенностей площадного распространения отложений ванаварской свиты с использованием структурного атрибута сейсмического волнового поля // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2017. – № 1. – С. 150–152.
3. Кузин А.М. О флюидной составляющей процесс образования зон трещиноватости и разрывных нарушений // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – № 5. – С. 43–50.
4. Оловянный А.Г. Механика горных пород. – М.: РАН, 2012. – 280 с.
5. Stearns D.W., Friedman M. Reservoir in fractured rock. Stratigraphic Oil and Gas Fields-Classification, Exploration Methods, and Case Histories // Memoir 16, Society of Exploration Geophysicists. – 1972. – № 10. – P. 82–106.
6. Невский В.А. Трещинная тектоника рудных полей и месторождений. – М.: Недра, 1979. – 224 с.
7. Чернышов С.Н. Трещины горных пород. – М.: Наука, 1983. – 240 с.
8. Михайлов А.Е. Структурная геология и геологическое картирование. – М.: Недра, 1984. – 464 с.
9. Михайлова С.В. Анализ сейсмических атрибутов – комплексный подход при концептуальном моделировании // Пронефть. Профессионально о нефти. – 2018. – № 2. – С. 31–35.
10. Cook A.C., Johnson K.R. Early joint formation in sediments // Geol. Mag. – 1970. – V. 107. – № 4. – P. 361–368.
11. Lisle R.J. Detection of zones of abnormal strains in structures using Gaussian curvature analysis // AAPG Bulletin. – 1994. – № 78. – P. 1811–1819.
12. Ramstad L.R. Geological modelling of fractured hydrocarbon reservoirs // Report Univ. of Trondheim. – 1977. – № 77–4.
13. Ермолов В.А. Геология. Ч. I. Основы геологии. – М.: МГУ, 2008. – 598С.
14. Seismic attributes application to evaluate the GORU clastics of Indus basin, Pakistan / M.N. Tayyab, S. Asim, M.M. Siddiqui, M. Naem, S.H. Solange, F.K. Babar // Arabian Journal of Geosciences. – 2017. – V. 10. – № 7. – P. 158–175.
15. Pirson S. How to map fracture development from well logs // World Oil. – March 1967. – P. 106–114.
16. Использование новых технологий и методов для повышения эффективности ГИС / О.Л. Сальникова, А.Д. Савич, А.В. Серкина, А.С. Чухлов // Теория и практика разведочной и промысловой геофизики. Сборник научных трудов по материалам международной научной-практической конференции. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2018. – С. 246–252.
17. Aguilera R. Analysis of naturally fractured reservoirs from conventional well logs // Journal of Petroleum Technology. – July 1976. – № 7. – V. 28. – P. 764–775.
18. Beck J., Schultz A., Fitzgerald D. Reservoir evaluation of fractured cretaceous carbonates in South Texas // 18<sup>th</sup> Annual Logging Symposium. – Houston, Texas Society of Petrophysicists and Well Log Analysts, 5–8 June, 1977. – 25 p.
19. Aguilera R., Van Poolen K. How to evaluate naturally fractured reservoirs from various well logs // Oil and Gas Journal. – Jan 1979. – P. 56–57.
20. The Borehole Televiewer – a New Logging Concept for Fracture Location and Other Types of Borehole Inspection. SPE 2402 / J. Zemanek, R.L. Caldwell, E.E. Glenn Jr., S.V. Holcomb, L.J. Norton, A.J.D. Straus // Journal of Petroleum Technology. – 1969. – V. 21. – № 6. – P. 762–774.
21. Morris R.L., Grine D.R., Arkfeld T.E. Using Compressional and Shear Acoustic Amplitudes for The Location of Fractures // Journal of Petroleum Technology. – June 1964. – V. 16. – № 6. – P. 623–633.
22. Князев А.Р., Малиновский А.К., Некрасов А.Н. Выделение тонких проницаемых пластов и уточнение границ коллекторов по данным скважинного акустического сканера // Каротажник. – 2017. – № 10 (280). – С. 34–40.
23. Шерстобитов В.В., Щербак А.С., Попов А.А. Применение сканирующих методов каротажа для уточнения геологического строения горных пород // Каротажник. – 2017. – № 7 (277). – С. 30–39.
24. Возможности бокового сканирующего каротажа для оценок трещиноватости и эффекта вызванной поляризации пород / А.П. Потапов, Г.И. Головацкая, В.Н. Даниленко, В.В. Даниленко, Т.С. Мамлеев // Каротажник. – 2011. – № 5 (203). – С. 53–62.
25. Fracture detection in oil-based drilling mud using a combination of borehole image and sonic logs / J. Lai, G. Wang, Z. Fan, J. Chen, Z. Zhou, S. Wang, Z. Wang, C. Xiao // Marine and Petroleum Geology. – 2017. – V. 84. – P. 195–214.
26. Сребродольская М.А., Федорова А.Ю. Скважинные сканирующие устройства: сравнительный анализ и интерпретация ими-

- джей // Природные процессы в нефтегазовой отрасли. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции Студенческого отделения европейской ассоциации геоученых и инженеров. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет: Библиотечно-издательский комплекс федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования, 2017. – С. 264–267.
27. Suau I.J., Gartner J. Fracture detection from logs // The log analyst. – March–April 1980. – V. 21 (2). – P. 3–13.
28. Seismic detection of subtle faults and fractures / V. Aarre, D. As-tratti, T.N. Dayyini, S.L. Mahmoud, A. Clark, M. Stellas, J. Stringer, B. Toelle, O. Vejbaek, G. White // Oilfield Review. – 2012. – V. 24. – № 2. – P. 28–43.
29. Grechka V. Applications of seismic anisotropy in the oil and gas industry. – Moscow: EAGE, 2014. – 171 p.
30. Grechka V., Mateeva A. Inversion of P-wave VSP data for local anisotropy: Theory and a case study // Geophysics. – 2007. – V. 72. – № 4. – P. 69–79.
31. Crampin S. Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting // Geophysics. – 1985. – № 50. – P. 142–152.
32. Crampin S. The New Geophysics: shear-wave splitting provides a window into the crack-critical rock mass 2003b // Leading Edge. – 2003. – № 22. – P. 536–549.
33. Lynn H. B., Thomsen L.A. Shear wave exploration along the principal axis // 56<sup>th</sup> Annual International Meeting, SEG. – Houston, TX (United States), 1986. – P. 473–476.
34. Relationship of P-Wave Seismic Attributes, Azimuthal Anisotropy, and Commercial Gas Pay in 3-D P-Wave Multiazimuth Data, Rulison Field, Piceance Basin, Colorado / H.B. Lynn, D. Campagna, K.M. Simon, W.E. Beckham // Geophysics. – July, August 1999. – № 4. – P. 1293–1311.
35. Bahorich M.S., Farmer S.L. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube // 65<sup>th</sup> Annual International Meeting. – Houston, TX (United States), 1995. – P. 93–96.
36. Blumentritt C.H., Marfurt K.J., Sullivan E.C. Volume-based curvature computations illuminate fracture orientations-Early to mid-Paleozoic, Central Basin Platform, West Texas // Geophysics. – 2006. – V. 71. – № 5. – P. 159–166.
37. Gersztenkorn A., Marfurt K.J. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping // Geophysics. – 1999. – V. 64. – № 5. – P. 1468–1479.
38. Кирилов А.С., Закревский К.Е. Практикум по сейсмической интерпретации в Petrel. – М.: Изд-во Маи-принт, 2014. – 288 с.
39. Коннов Д.А., Курмангалиев С.Б., Бражник А.Ю. Методика выявления разрывных нарушений на основании данных сейсморазведки при помощи различных методов атрибутивного анализа // Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Астрахань: Астраханский государственный технический университет, 2017. – С. 76–79.
40. Mai H.T. Coherence and volumetric curvatures and their spatial relationship to faults and folds, an example from Chicotepec basin, Mexico // 79<sup>th</sup> SEG Meeting: Expand. Abstr. – Houston, TX (United States), 2009. – P. 1063–1067.
41. Сейсмическая когерентность при флуктуациях временных задержек сигнала / Ю.К. Тяпкин, Я.В. Мендрий, А.Ю. Щеголихин, А.Н. Тяпкина // Геофизический журнал. – 2018. – Т. 40. – № 2. – С. 30–47.
42. Septian L.S., Maulana A.I. Geological model of reservoir based on seismic attributes and ant tracking case study – f3 block, offshore Netherlands // 75<sup>th</sup> European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2013 Incorporating. – London, UK, 2013. – P. 6183–6185.
43. Мельник И.А. Вторичная каолинизация песчаных пластов как признак тектонических нарушений осадочного чехла // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2014. – № 9. – С. 22–27.
44. Швецова М.Н. Прогноз коллекторских свойств на основе атрибутивного анализа // Сборник научных трудов по материалам XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3-х т. – Пермь, 2018. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2018. – С. 325–329.
45. Митюхина И.Ю., Спасский Б.А., Заключнов И.С. Изучение межскважинного пространства на основе многомерного анализа атрибутов сейсмических записей // Геофизика. – 2017. – № 5. – С. 44–49.
46. Волкова А.А. Комплексный анализ сейсмических и скважинных данных при изучении трещиноватых коллекторов на примере месторождения в фундаменте // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М.И. Кучина. – Томск, 2017. – С. 356–358.
47. Chopra S., Marfurt K.J. Integration of coherence and volumetric curvature images // The Leading Edge. – 2010. – V. 29. – № 9. – P. 1092–1107.
48. Chopra S., Marfurt K.J. Volumetric curvature attributes for fault fracture characterization. // First Break. – 2007. – V. 25. – № 7. – P. 35–46.
49. Roberts A. Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons // First Break. – 2001. – V. 19. – № 2. – P. 85–100.
50. Абетова С.А., Абетов А.Е. Интерпретация тектонических нарушений в объектах моделирования с использованием алгоритма Ant-tracking в программном обеспечении Petrel // Геология и охрана недр. – 2017. – № 4 (65). – С. 51–55.

Поступила 09.05.2019 г.

#### Информация об авторах

**Орехов А.Н.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Аmani Мангуа Марк М.**, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.832, 550.834.05

## POSSIBILITIES OF GEOPHYSICAL METHODS FOR PREDICTING RESERVOIR FRACRURES

Alexandr N. Orekhov<sup>1</sup>,  
orekhovan@mail.tomsknet.ru

Amani Mangoua Marc M<sup>1</sup>,  
mangouam@yahoo.fr

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

*This article presents the results of an analysis of Russian and foreign publications, performed in order to characterize the current state of an issue of using geophysical methods to predict reservoir fracturing. The paper describes the peculiarities of fracture occurrence depending on its genesis. The authors have characterized tectonic and geological conditions of crack formation and the relation between cracks and fissures. The text also provides a geological model of cracking. The paper introduces the characteristic of methods which allows studying the fracturing both in a well (the methods of geophysical surveys of wells) and from the surface (according to the results of seismic exploration) and the features of the most demanded seismic attributes for solution of these problems. The description is given and the range of tasks to be solved is determined both for the most widespread variants of well logging and innovative methods offered by Schlumberger on the basis of well logging methods. A conclusion is made that well logging methods need to be integrated. The physical bases of seismic study methods of fracturing are given and the main attributes are described. Their capabilities and limitations are determined and as a result the range of issues demanding additional research is outlined.*

**The aim** of the research is to identify the areas for further research in order to improve the efficiency of geophysical work in studying fractured reservoirs by creating a review of geophysical methods used to identify the areas for increasing fractures, further analysis of existing methods and determination of the best ways to solve these problems.

**Results.** The article analyzes geophysical methods for identification of fractured reservoirs (both well logging methods and seismic attributes). The circle of unsolved problems is defined. The direction for further research is outlined.

**Key words:**

Reservoir, fissured-cavernous type, seismic attributes, geophysical methods of well logging.

## REFERENCES

1. Van Golff-Raht T.D. *Osnovy neftepromyslovoy geologii i razrabotki treshchinovatykh kolektorov* [Fundamentals of fractured reservoirs engineering], Translated from English by N.A. Bardina, P.K. Golovanov, V.V. Vlasenko, V.V. Pokrovsky. Ed. by A.G. Kovalev. Moscow, Nedra Publ., 1986. 607 p.
2. Molodovskiy V.A., Pozdnyakov V.A., Matrosov K.O. Mapping the features of areal distribution of Vanavara formation deposits using structure attribute of seismic wave field. *Bulletin of the Voronezh State University. Series: Geology*, 2017, no. 1, pp. 150–152. In Rus.
3. Kuzin A.M. Fluid component of formation of fracturing zones and discontinuous disturbances. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2014, no. 5, pp. 43–50. In Rus.
4. Oliavin A.G. *Mekhanika gornyykh porod* [Mechanics of rocks]. Moscow, RAS Publ., 2012. 280 p.
5. Stearns D.W., Friedman M. Reservoir in fractured rock. Stratigraphic Oil and Gas Fields-Classification, Exploration Methods, and Case Histories. *Memoir 16, Society of Exploration Geophysicists*, 1972, no. 10, pp. 82–106.
6. Nevsky V.A. *Treshchinnaya tektonika rudnykh poley i mestorozhdeniy* [Fractured tectonics of fields and deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1979. 224 p.
7. Chernyshov S.N. *Treshchiny gornyykh porod* [Cracks of rocks]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 240 p.
8. Mikhailov A.E. *Strukturnaya geologiya i geologicheskoe kartirovanie* [Structural geology and geological mapping]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 464 p.
9. Mikhailova S.V. Conceptual model, attribute analysis, petrophysical model, seismic model. *Proneft. Professionally about oil*, 2018, no. 2, pp. 31–35. In Rus.
10. Cook A.C., Johnson K.R. Early joint formation in sediments. *Geol. Mag.*, 1970, vol. 107, no. 4, pp. 361–368.
11. Lisle R.J. Detection of zones of abnormal strains in structures using Gaussian curvature analysis. *AAPG Bulletin*, 1994, no. 78, pp. 1811–1819.
12. Ramstad L.R. Geological modelling of fractured hydrocarbon reservoirs. *Report Univ. of Trondheim*, 1977. No. 77–4.
13. Ermolov V.A. *Geologiya. Ch. I. Osnovy geologii* [The fundamentals of geology. P. I]. Moscow, MSU Publ., 2004. 598 p.
14. Tayyab M.N., Asim S., Siddiqui M.M., Naeem M., Solange S.H., Babar F.K. Seismic attributes' application to evaluate the gornu clastics of Indus basin, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, 2017, vol. 10, no. 7, pp. 158–175.
15. Pirson S. How to map fracture development from well logs. *World Oil*, March 1967, pp. 106–114.
16. Salnikova O.L., Savich A.D., Serkina A.V., Chukhlov A.S. *Ispolzovanie novykh tekhnologiy i metodov dlya povysheniya effektivnosti GIS* [Using new technologies and methods to improve the effectiveness of Well logging]. *Teoriya i praktika razvedochnoy i promyslovoy geofiziki. Sbornik nauchnykh trudov po materialam mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Theory and practice of exploration and field geophysics. Collection of scientific papers on the materials of the international scientific-practical conference]. Perm, Perm State National Research University, 2018, pp. 246–252.
17. Aguilera R. Analysis of naturally fractured reservoirs from conventional well logs. *Journal of Petroleum Technology*, July 1976, vol. 28, no. 7, pp. 764–775.
18. Beck J., Schultz A., Fitzgerald D. *Reservoir evaluation of fractured cretaceous carbonates in South Texas. 18<sup>th</sup> Annual Logging Symposium*. Houston, Texas Society of Petrophysicists and Well Log Analysts, 5–8 June, 1977. 25 p.
19. Aguilera R., Van Poolen K.H. How to evaluate naturally fractured reservoirs from various well logs. *Oil and Gas Journal*, Jan 1979, pp. 56–57.
20. Zemanek J., Caldwell R.L., Glenn E.E. Jr., Holcomb S.V., Norton L.J., Straus A.J.D. The Borehole Televiwer – a New Logging Concept for Fracture Location and Other Types of Borehole Inspection. SPE 2402. *Journal of Petroleum Technology*, 1969, vol. 21, no. 6, pp. 762–774.

21. Morris R.L., Grine D.R., Arkfeld T.E. Using Compressional and Shear Acoustic Amplitudes for The Location of Fractures. *Journal of Petroleum Technology*, June 1964, vol. 16, no. 6, pp. 623–633.
22. Knyazev A.R., Malinovsky A.K., Nekrasov A.N. Detecting thin permeable formations and refining reservoir boundaries from the downhole sonic scanner information. *Logger*, 2017, no. 10 (280), pp. 34–40. In Rus.
23. Sherstobitov V.V., Shcherbak A.S., Popov A.A. Applying scanning logs to refine the geological structure of the rocks. *Logger*, 2017, no. 7 (277), pp. 30–39. In Rus.
24. Potapov A.P., Golovatskaya G.I., Danilenko V.N., Danilenko V.V., Mamleev T.S. Capabilities of scanning lateral logging for evaluation of rock fracturing and induced polarization effect. *Logger*, 2011, no. 5 (203), pp. 53–62. In Rus.
25. Lai J., Wang G., Fan Z., Chen J., Zhou Z., Wang S., Wang Z., Xiao C. Fracture detection in oil-based drilling mud using a combination of borehole image and sonic logs. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, vol. 84, pp. 195–214.
26. Srebrdolskaya M.A., Fedorova A.Y. Skvazhinnye skaniruyushchie ustroystva: sravnitelny analiz i interpretatsiya imidzhey [Wells Scanning Devices: Comparative Analysis and Image Interpretation]. *Prirodnye processy v neftegazovoy otrasli. Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii Studencheskogo otdeleniya evropeyskoy assotsiatsii geouchenykh i inzhenerov* [Natural Processes in the Oil and Gas Industry. Collection of scientific papers of the International Scientific and Practical Conference of the Student Branch of the European Association of Geoscientists and Engineers]. Tyumen, Tyumen Industrial University Publ., 2017. pp. 264–267.
27. Suau I.J., Gartner J. Fracture detection from logs. *The log analyst*, March–April 1980, vol. 21 (2), pp. 3–13.
28. Aarre V., Astratti D., Dayyini T.N., Mahmoud S.L., Clark A., Stellas M., Stringer J., Toelle B., Vejbaek O., White G. Seismic detection of subtle faults and fractures. *Oilfield Review*, 2012, vol. 24, no. 2, pp. 28–43.
29. Grechka V. *Applications of seismic anisotropy in the oil and gas industry*. Moscow, EAGE, 2014. 171 p.
30. Grechka V., Mateeva A. Inversion of P-wave VSP data for local anisotropy: Theory and a case study. *Geophysics*, 2007, vol. 72, no. 4, pp. 69–79.
31. Crampin S. Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting. *Geophysics*, 1985, no. 50, pp. 142–152.
32. Crampin S. The New Geophysics: shear-wave splitting provides a window into the crack-critical rock mass 2003b. *Leading Edge*, 2003, no. 22, pp. 536–549.
33. Lynn H.B., Thomsen L.A. Shear wave exploration along the principal axis. *56<sup>th</sup> Annual International Meeting, SEG*. Houston, TX (United States), 1986. pp. 473–476.
34. Lynn H.B., Campagna D., Simon K.M., Beckham W.E. Relationship of P-Wave Seismic Attributes, Azimuthal Anisotropy, and Commercial Gas Pay in 3-D P-Wave Multiazimuth Data, Rulison Field, Piceance Basin, Colorado. *Geophysics*, July, August 1999, no. 4, pp. 1293–1311.
35. Bahorich M.S., Farmer S.L. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube. *65<sup>th</sup> Annual International Meeting*, Houston, TX (United States), 1995. pp. 93–96.
36. Blumentritt C.H., Marfurt K.J., Sullivan E. Volume-based curvature computations illuminate fracture orientations—Early to mid-Paleozoic, Central Basin Platform, West Texas. *Geophysics*, 2006, vol. 71, no. 5, pp. 159–166.
37. Gersztenkorn A., Marfurt K. J. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping. *Geophysics*, 1999, vol. 64, no. 5, pp. 1468–1479.
38. Kirilov A.S., Zakrevsky K.E. *Praktikum po seismicheskoy interpretatsii v Petrel* [Workshop on seismic interpretation in Petrel]. Moscow, Mai-print Publ., 2014. 288 p.
39. Konnov D.A., Kurmangaliyev S.B., Brazhnik A.Yu. Metodika vyavleniya razryvnykh narusheniy na osnovanii dannykh seysmorazvedki pri pomoshchi razlichnykh metodov atributivnogo analiza [Methods of detecting faults based on seismic data using various methods of attributive analysis]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference]. Astrakhan, Astrakhan State Technical University Press, 2017. pp. 76–79.
40. Mai H.T. Coherence and volumetric curvatures and their spatial relationship to faults and folds, an example from Chicotepec basin, Mexico. *79<sup>th</sup> SEG Meeting: Expand. Abstr.* Houston, TX (United States), 2009. pp. 1063–1067.
41. Tyapkin Yu.K., Mendriy Ya.V., Schegolikhin A.Yu., Tyapkina A.N. Seismic coherence in the presence of signal time-delay fluctuations. *Geophysical journal*, 2018, vol. 40, no. 2, pp. 30–47. In Rus.
42. Septian L.S., Maulana A.I. Geological model of reservoir based on seismic attributes and ant tracking case study – f3 block, offshore Netherlands. *75<sup>th</sup> European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2013 Incorporating*. London, UK, 2013. pp. 6183–6185.
43. Melnik I.A. Secondary kaolinization of sand layers as a sign of tectonic disturbance of the sedimentary cover. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2014, no. 9, pp. 22–27. In Rus.
44. Shvetsova M.N. Prognoz kolektorskikh svoystv na osnove atributivnogo analiza [Prediction of reservoir properties based on attribute analysis]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam XI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Proc. of the XI International scientific conference of students, postgraduates and young scientists]. Perm, Perm State National Research University Press, 2018. pp. 325–329.
45. Mityukhina I.Yu., Spassky B.A., Kronovna I.S. Study of the interwell space based on multidimensional analysis of the attributes of seismic records. *Geophysics*, 2017, no. 5, pp. 44–49.
46. Volkova A.A. Kompleksny analiz seysmicheskikh i skvazhinnykh dannyykh pri izuchenii treshchinovatykh kolektorov na primere mestorozhdeniya v fundamente [Analysis of seismic and well data when studying fractured reservoirs using the example of a field in the basement of western Siberia]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XXI Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashchennogo 130-letiyu so dnya rozhdeniya professora M.I. Kuchina* [Problems of Geology and Subsoil Development. Proc. of the XXI International Symposium of academician M.A. Usov of students and young scientists dedicated to the 130<sup>th</sup> anniversary of the birth of professor M.I. Kuchin]. Tomsk, 2017. pp. 356–358.
47. Chopra S., Marfurt K.J. Integration of coherence and volumetric curvature images. *The Leading Edge*, 2010, vol. 29, no. 9, pp. 1092–1107.
48. Chopra S., Marfurt K.J. Volumetric curvature attributes for fault fracture characterization. *Chopra. First Break*, 2007, vol. 25, no. 7, pp. 35–46.
49. Roberts A. Curvature attributes and their application to 3D interpreted horizons. *First Break*, 2001, vol. 19, no. 2, pp. 85–100.
50. Abetova S.A., Abetov A.E. Interpretation of tectonic disturbances in modeling objects using the ant-tracking algorithm in Petrel software. *Geology and protection of mineral resources*, 2017, no. 4 (65), pp. 51–55. In Rus.

Received: 9 May 2019.

#### Information about the authors

**Alexander N. Orekhov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Amani Mangoua Marc M**, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 504.064.47

## КОМПЛЕКСНАЯ РЕКУЛЬТИВАЦИЯ ТЕРРИТОРИИ ПАВЕЛЬЦЕВСКОЙ НЕФТЕБАЗЫ

Островский Юрий Владимирович<sup>1,2</sup>,  
ostrovskij@corp.nstu.ru, YuVOstrovskiy@aogspi.ru

Заборцев Григорий Михайлович<sup>2</sup>,  
GMZaborcev@aogspi.ru

Черноок Владислав Анатольевич<sup>2</sup>,  
VACHernook@aogspi.ru

Крестинин Афанасий Александрович<sup>3</sup>,  
AAKrestinin@aogspi.ru

<sup>1</sup> Новосибирского государственного технического университета,  
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

<sup>2</sup> Новосибирского филиала АО «Государственный специализированный проектный институт»,  
Россия, 630075, г. Новосибирск, ул. Б. Хмельницкого, 2.

<sup>3</sup> АО «Государственный специализированный проектный институт»,  
Россия, 115088, г. Москва, ул. Шарикоподшипниковская, 4, корп. 1А.

**Актуальность.** В геологическом строении исследованного участка в пределах глубины 20,0 м представлены четвертичные ( $Q_{II-IV}$ ) отложения: покровные, озерно-ледниковые, флювиогляциальные, песчано-глинистыми днепровско-московского межледниковья; моренные глинистые московской и днепровской стадий оледенения; флювиогляциальные пески окско-днепровского межледниковья. Данные грунты, слагающие площадку Павельцевской нефтебазы (г. Долгопрудный Московской области), работающей с 50-х гг. XX в., в той или иной мере загрязнены нефтепродуктами, а также тяжелыми металлами (свинец, медь, цинк, никель). Нефтепродукты в результате проливов просочились в грунт и достигли уровня грунтовых вод (5,5–6,5 м), образовав в зонах распространения линз и прослоев песчаных грунтов различной крупности в глинистой толще плавающие линзы из смеси бензина и дизельного топлива мощностью от 0,2 до 0,4 м. Обнаружено значительное загрязнение нефтепродуктами вод реки Безымянная, образующей перед впадением в Клязьминское водохранилище пруд, примыкающий к территории нефтебазы, что может быть связано с разгрузкой в пруд линз нефтепродуктов.

**Цель:** разработка оптимальной схемы рекультивации загрязненных нефтепродуктами четвертичных песчано-глинистых грунтов, слагающих площадку Павельцевской нефтебазы на основе результатов инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий, включая лабораторные геохимические исследования.

**Методы:** инженерно-геологические исследования грунтов – бурение скважин, лабораторные геоэкологические исследования проб грунтов, наблюдение за уровнем подземных вод, определение влияния биопрепаратов на деградацию нефтепродуктов и гуминовых препаратов на подвижность ионов тяжелых металлов в грунтах, грунтовых водах надморенного водоносного горизонта во флювиогляциальных песчано-глинистых отложениях днепровско-московского межледниковья и подземных водах подморенного (надюрского) водоносного горизонта во флювиогляциальных песчаных отложениях окско-днепровского межледниковья.

**Результаты.** Предложена схема комплексной рекультивации загрязненных грунтов площадки Павельцевской нефтебазы, включающая откачку линз нефтепродуктов, иммобилизацию тяжелых металлов в грунтах с использованием гуминовых препаратов (препарат «Энерген Экстра»), деградацию нефтепродуктов биопрепаратами («БИООИЛ-АА» разработка ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» г. Новосибирск) и установку гидравлической завесы (дренажа). Реализация предложенной схемы позволит извлечь нефтепродукты, провести иммобилизацию тяжелых металлов в поверхностном слое грунта, резко снизить в нем содержание нефтепродуктов, существенно снизить поступление нефтепродуктов из зоны аэрации грунтов Павельцевской нефтебазы в пруд реки Безымянная в зоне разгрузки грунтовых вод.

### Ключевые слова:

Нефтебаза, загрязнение грунтов, нефтепродукты, тяжёлые металлы, рекультивация, гуминовые препараты, биопрепараты, линзы нефтепродуктов, гидравлическая завеса.

### Введение

Павельцевская нефтебаза (ЗАО «Универсал-Нефть», г. Долгопрудный Московской обл.) была построена в 50-х гг. XX в. на левом берегу реки Клязьмы и имеет искусственную гавань, способную принимать нефтеналивные суда. Павельцевская нефтебаза до настоящего времени используется для снабжения светлыми нефтепродуктами (бензин и дизельное топливо) предприятий Подмо-

сковья. Совокупный объем хранения нефтепродуктов достигает 180000 м<sup>3</sup>; это вторая по величине действующая нефтебаза Московской области.

Грунты площадки Павельцевской нефтебазы загрязнены нефтепродуктами в результате проливов во время перекачки при загрузке и разгрузке или в результате нарушений герметичности топливных танков, при этом в процессе инфильтрации нефтепродукты достигли уровня грунтовых

вод, образовав на отдельных участках плавающие линзы.

В воде реки Безымянная, образующей перед впадением в Клязьминское водохранилище пруд, примыкающий к территории Павельцевской нефтебазы, обнаружено трехкратное превышение концентрации нефтепродуктов над нормативным.

Кроме нефтепродуктов в грунтах Павельцевской нефтебазы содержатся примеси тяжёлых металлов (свинца, меди, цинка, никеля, кадмия), которые попали в грунт с нефтепродуктами в качестве антидетонирующей присадки к моторному топливу (тетраэтилсвинец) или как их примеси.

Для рекультивации грунтов Павельцевской нефтебазы необходимо провести мероприятия по предотвращению миграции нефтепродуктов, тяжёлых металлов в грунтах, грунтовых и подземных водах, ликвидировать линзы нефтепродуктов, а также создать надёжный заслон выносу нефтепродуктов грунтовыми водами в пруд реки Безымянная, примыкающий к территории нефтебазы, и далее в Клязьминское водохранилище.

Загрязнение грунтов площадки Павельцевской нефтебазы нефтепродуктами не является уникальным явлением. В настоящее время в нашей стране имеются обширные исследования по установлению степени загрязнения грунтов предприятий нефтедобычи, переработки и мест хранения нефтепродуктов, а также предложены методы борьбы с этими загрязнениями [1, 2].

Наиболее опасными из нефтепродуктов считаются плавающие линзы нефтепродуктов на поверхности грунтовых вод (мощностью до 1–3 м), которые могут захватывать значительные территории нефтебаз [2]. Удаление линз нефтепродуктов осуществляют методом откачки непосредственно из линзы или созданием гидравлической завесы [3]. Для очистки нефтезагрязнённых грунтов широко применяется метод биоремедиации с использованием биопрепаратов [4–7].

Рекультивацию грунтов и грунтовых вод в некоторых случаях осуществляют методом самоочистки [8], но это требует прекращения производственной деятельности на данной территории и ее вывода на длительное время (20–30 лет) из народнохозяйственного оборота.

#### Геологическое строение грунтов Павельцевской нефтебазы

В результате инженерно-геологических изысканий (геологическое строение грунтов, гидрогеологические условия), выполненных отделом комплексных инженерных изысканий АО «ГСПИ» (г. Москва) установлено, что для района в границах площадки Павельцевской нефтебазы в пределах исследованной глубины 20,0 м характерно распространение четвертичных ( $Q_{II-IV}$ ) песчано-глинистых отложений, представленных техногенными, покровными, флювиогляциальными, озёрно-ледниковыми и моренными суглинками с линзами и прослоями песков различной крупности общей

мощностью толщи 16,0–16,5 м, которые подстилаются песчаными отложениями окско-днепровского межледниковья, насыщенными водой. Инженерно-геологические изыскания выполнены АО «Государственный специализированный проектный институт» (г. Москва).

В пределах площадки нефтебазы четвертичные отложения представлены:

- насыпными техногенными грунтами ( $tQ_{IV}$ ), образованными при планировке площадки: суглинком туго- и мягкопластичным, с включением строительного мусора, мощность слоя 2,0–4,0 м;
- покровными отложениями ( $prQ_{III}$ ): суглинком тяжелым пылеватым, редко песчанистым (местами глиной легкой пылеватой) тугопластичным, участками полутвердый, коричневым, мощность слоя составляет 1,0–2,0 м;
- моренными отложениями Московской стадии оледенения ( $gQ_{II}^{ms}$ ): суглинками лёгкими песчанистыми, от мягкопластичных до полутвёрдых, с включением гравия, гальки, редко валунов изверженных и осадочных пород до 20–25 %, которые распространены на участках с высокими отметками поверхности земли, мощность слоя 2,0–4,0 м;
- флювиогляциальными отложениями одицовского межледниковья ( $fQ_{II}^{dn-ms}$ ), распространёнными повсеместно: полутвердыми, текуче-пластичными суглинками, песками мелкими, средней крупности и гравелистыми, общей мощностью толщи 5,0–7,0 м;
- моренными отложениями Днепровской стадии оледенения ( $gQ_{II}^{dn}$ ): суглинками лёгкими песчанистыми, от тугопластичных до полутвёрдых, с включением гравия, гальки, редко валунов изверженных и осадочных пород до 10–15 %, распространённых повсеместно, мощность слоя 4,0–6,0 м;
- флювиогляциальными песчано-глинистыми отложениями окско-днепровского межледниковья ( $fQ_{II}^{ok-dn}$ ): суглинками мягкопластичными и песками мелкими, насыщенными водой, мощностью слоя 2,0–3,0 м.

Мощность толщи комплекса четвертичных отложений достигает 15–20 м.

#### Гидрогеологические условия

По возрасту и литологическому составу водонасыщающих пород в пределах района выделяются два основных комплекса подземных вод, относящихся к четвертичным отложениям.

Водоносный комплекс подземных вод в четвертичных отложениях подразделяется на два горизонта. Первый горизонт – надморенный (водонасыщающими грунтами являются песчано-глинистые отложения одицовского межледниковья, водопором – моренные глинистые отложения днепровской стадии оледенения). Горизонт безнапорный на участках распространения отложений московской морены обладает местным напором до 1–2 м, уровень вод залегает на глубине 3–4 м.

Второй горизонт – подморенный (надъюрский), относящийся к песчано-глинистым флювиогляциальным отложениям окско-днепровского межледниковья, вскрывается на глубине 11–15 м, горизонт напорный, пьезометрический уровень устанавливается на глубине 6–8 м, величина напора составляет 5–7 м.

#### Загрязнение грунтов Павельцевской нефтебазы

Методологической основой для проведенных исследований по оценке уровня загрязнения нефтепродуктами грунтов и подземных вод, а также санации территорий являлись работы В.М. Гольдберга [3] и В.В. Середина [9].

Главный принцип, из которого исходили при разработке мероприятий по ликвидации последствий загрязнения почв нефтепродуктами и тяжелыми металлами – *не нанести экосистеме больший вред, чем тот, который уже нанесен при загрязнении*.

Содержание нефтепродуктов в грунтах определяли по ПНД Ф 16.1.41–04 [10]. Определение тяжелых металлов проводили по методикам фотометрического анализа, а также на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивной связанной плазмой iCAP 6300 Duo (Thermo Scientific, США), предназначенном для проведения качественного, полуколичественного и количественного элементного анализа самых разнообразных объектов.

Для биоремедиации грунтов, загрязненных нефтепродуктами, использовали биопрепарат «БИООЙЛ-АА», разработанный ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор», г. Новосибирск.

Препарат представляет собой смесь культур микроорганизмов *Acinetobacter*, *Enterobacter*, *Bacillus*, активно катаболизирующих длинноцепочечные предельные углеводороды и находящихся в лиофилизированном (высушенном) состоянии. Количество жизнеспособных бактериальных клеток в 1 грамм – не менее  $1,0 \cdot 10^8$ .

Скорость переработки (разложения) нефтепродуктов в грунтах биопрепаратом рассчитывали по формуле:

$$W = \frac{m_{н/п}}{m_{БП} \cdot \tau},$$

где  $W$  – скорость переработки нефтепродуктов, г/г\*сутки;  $m_{н/п}$  – масса переработанных нефтепродуктов, г;  $m_{БП}$  – масса внесенных биопрепаратов, г;  $\tau$  – время обработки, сутки.

#### Результаты и их обсуждение

Типичный вид грунтов территории Павельцевской нефтебазы представлен на инженерно-геологическом разрезе (рис. 1).

Питание горизонта грунтовых вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков. Грунтовые воды располагаются на глубине 5,5–6,5 м. В периоды весеннего снеготаяния и осенних затяжных дождей возможен подъем уровня подземных вод на 1,0 м.

Подземные воды подморенного водоносного горизонта напорные. Верхним водоупором служат моренные суглинки тугопластичные (по данным обследования Павельцевской нефтебазы в 2014 г.).

На большом участке размыва моренных отложений происходит объединение вод двух горизонтов: грунтового и подморенного. Общее направление потока грунтовых вод с севера на юг.

Линзы нефтепродуктов, локализованные на участках распространения песчаного грунта различной крупности, местами крупнообломочного щебенистого грунта с песчаным заполнителем, содержат смесь бензина и дизельного топлива.

В зоне аэрации грунтов Павельцевской нефтебазы вследствие длительного (более 50 лет) нахождения нефтепродуктов, в частности дизельного топлива, содержащего смесь углеводородов с температурой кипения 200–350 °С, происходит постепенное накопление смолисто-асфальтовых фракций – продуктов биodeградации этих нефтепродуктов [11]. Поэтому нефтепродукты в грунтах Павельцевской нефтебазы, вероятно, представлены не исходными летучими светлыми нефтепродуктами (бензин, дизельное топливо), а высокомолекулярными высококипящими углеводородами.

Содержание нефтепродуктов в поверхностном слое грунта Павельцевской нефтебазы изменяется от 60 до 5015 мг/кг (среднее содержание 1253 мг/кг), а на глубине в суглинках – от 520 до 3460 мг/кг (среднее содержание 1816 мг/кг). Таким образом, грунты Павельцевской нефтебазы по уровню загрязнения почв нефтепродуктами относятся в основном к слабо- или условно загрязненным почвам, и только отдельные участки – к высокозагрязненным [12].

Распределение нефтепродуктов по глубине грунтов площадки нефтебазы представлено на рис. 2. Данное распределение нефтепродуктов по классификации В.В. Середина [9] относится к первому типу. Уменьшение концентрации нефтепродуктов с увеличением глубины обусловлено капиллярным поднятием углеводородов к земной поверхности по мелким порам грунтов, представленных преимущественно суглинками.

Распределение нефтепродуктов в грунтах по глубине на площадке Павельцевской нефтебазы может быть описано уравнением:

$$C = 1692,08 - 295,39h \text{ при } R = -0,455,$$

где  $C$  – концентрация нефтепродуктов в грунте, мг/кг;  $h$  – глубина отбора образца грунта, м.

Распределение тяжелых металлов (свинец, медь, цинк, никель) в грунтах на площадке Павельцевской нефтебазы (рис. 3) по классификации В.В. Середина относится к третьему типу – хаотичному изменению содержания по глубине [9]. Такое распределение обусловлено, вероятно, сорбцией тяжелых металлов на грунтах [13, 14].

Препараты, используемые для ремедиации почв, можно условно разделить на две группы. Первая группа – препараты, которые обеспечивают иммобилизацию (снижение подвижности) пол-

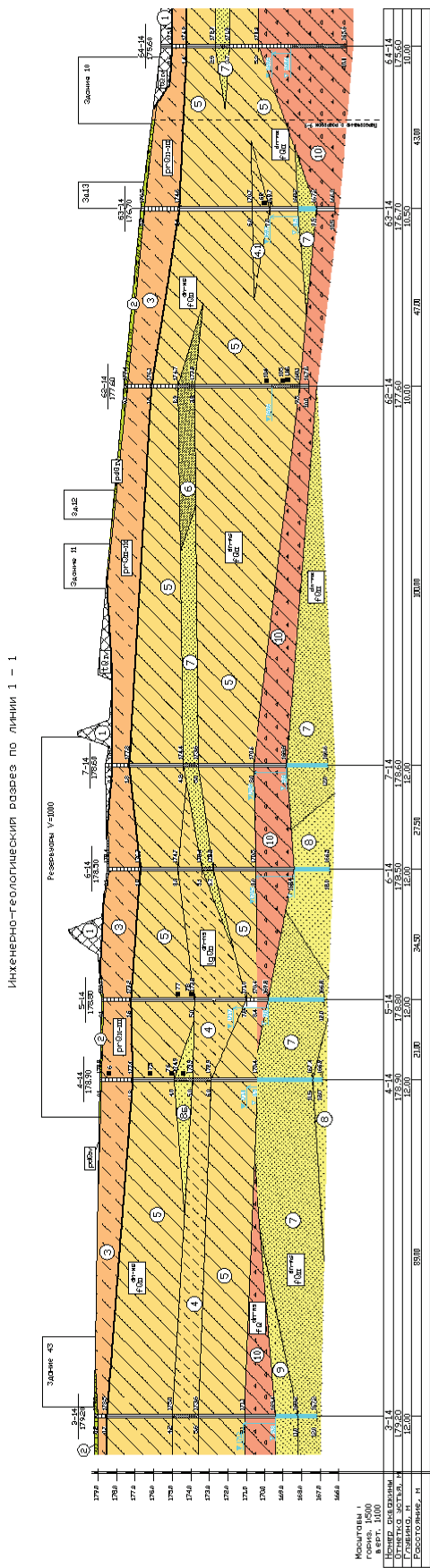


Рис. 1. Геолого-гидрогеологический разрез площадки Павельцевской нефтебазы: 1 – насыпной грунт – суглинок тяжелый пылеватый; 2 – почвенно-растительный слой (суглинок легкий песчаный с примесью органических веществ); 3 – суглинок тяжелый пылеватый, полутвердый, местами тугопластичный; 4 – суглинок тяжелый пылеватый, тугопластичный с прослойками песка; 5 – суглинок легкий песчаный, тугопластичный; 6 – песок пылеватый средней плотности; 7 – песок мелкий, средней плотности; 8 – песок средней крупности, средней плотности; 8Б – песок средней крупности, плотный; 9 – песок гравелистый, средней плотности; 10 – суглинок тяжелый пылеватый, щебенистый, полутвердый, тугопластичный

Fig. 1. Geological and hydrogeological section of the site of the Paveltsevskaia tank farm: 1 – bulk soil – loam light sandy with impurity of organic matter; 2 – soil and plant layer (loam heavy dusty); 3 – bulk soil – loam heavy dusty; 4 – loam heavy dusty, refractory; 5 – loam light sandy, refractory; 6 – medium density sandy, medium density; 7 – sand gravelly, medium density; 8 – sand medium size, dense; 8Б – sand medium size, dense; 9 – sand medium size, dense; 10 – sand medium size, dense

лютантов, тяжелых металлов в грунтах (например, гуминовые препараты, полученные из бурого угля или торфа) [15]. Ко второй группе относятся препараты, которые обеспечивают биоремедиацию грунтов – очистку от нефтепродуктов за счет дополнительно внесенных в почву микроорганизмов и активизации питательными субстратами аборигенной почвенной микрофлоры [4, 16, 17].

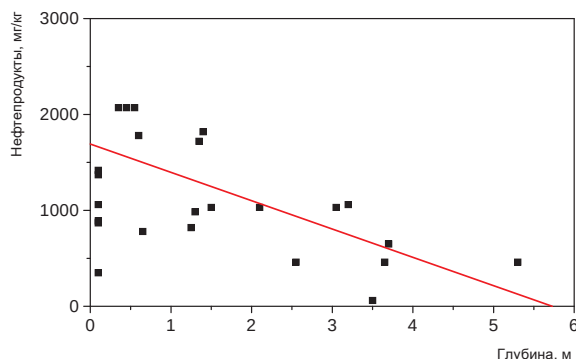


Рис. 2. Распределение нефтепродуктов в грунтах по глубине на площадке нефтебазы

Fig. 2. Depth distribution of oil products in subsoil within the tank farm territory

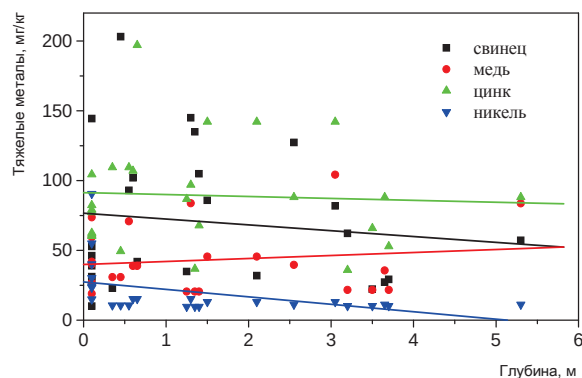


Рис. 3. Распределение тяжелых металлов в грунтах по глубине на площадке нефтебазы

Fig. 3. Depth distribution of heavy metals in subsoil within the tank farm territory

К ним можно отнести все известные отечественные препараты-биодеструкторы нефтепродуктов – «Путидойл», «Дестройл», «Родер», «Универсал», «Биоойл» и др. [5].

#### Обработка грунтов гуминовыми препаратами

Концентрации тяжелых металлов в грунтах площадки Павельцевской нефтебазы многократно превышают ПДК (ГН 2.1.7.2041–06) в почве, однако очистка этих грунтов от металлов традиционным методом (промывка грунтов) нецелесообразна по экономическим и экологическим соображениям, поскольку приводит к дополнительному загрязнению почвы промывными реагентами.

Более предпочтительно в данном случае связывание загрязняющих веществ в нерастворимые со-

единения, что широко используется при обращении с грунтами, загрязненными тяжелыми металлами [18–20].

Гуминовые препараты являются естественными для окружающей среды, не образуют токсичных соединений в почве и воде, не загрязняют атмосферу, не оказывают негативного влияния на флору, фауну и биогеоценозы в целом, даже при использовании высоких доз [21].

Внесение гуминовых препаратов в грунты, загрязненные тяжелыми металлами (цинк, свинец, никель, медь и др.), обеспечивает связывание их токсичных форм в безопасные нерастворимые металлоорганические комплексы, устойчивые длительное время в широком диапазоне pH [22–28]. Полученные комплексы практически не обладают подвижностью и способностью к миграции: их коэффициент фильтрации не превышает  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  м/сутки, что намного меньше коэффициентов фильтрации суглинков ( $1 \cdot 10^{-2}$ – $5 \cdot 10^{-2}$  м/сутки) [22].

Распространение гуминовых препаратов по всему слою грунта осуществляется благодаря инфильтрации атмосферных осадков.

Пропитка суглинка (модели основной части грунта площадки Павельцевской нефтебазы), загрязненного тяжелыми металлами (Pb, Cu, Zn, Ni), 0,06 %-м раствором гумата калия (был использован гуминовый препарат «Энерген Экстра» ЗАО «ТПК Техноэкспорт») при соотношении (масс.) гумат калия/тяжелые металлы=2,5–3,0:1 приводит к полной иммобилизации тяжелых металлов в суглинке, что связано, вероятно, с образованием нерастворимых соединений свинца, меди, цинка и никеля с гуминовыми кислотами.

Кроме иммобилизации тяжелых металлов гуминовые препараты улучшают структуру почвы, увеличивают её влагоемкость, улучшают газообмен, то есть проявляют свойства мелиорантов [29]. Благодаря редокс-медиаторным свойствам гуминовых веществ, содержащихся в гуминовых препаратах, ускоряются процессы анаэробного разложения органических веществ, загрязняющих почвы [30].

#### Биоремедиация грунтов, загрязненных нефтепродуктами

В экспериментах по разложению нефтепродуктов биодеструкторами в качестве модельных грунтов использовали: почву (модель насыпного поверхностного слоя грунта площадки нефтебазы), суглинок (модель основной части грунта) и песок (модель проницаемых включений в грунте).

Грунты были загрязнены аналогом смолисто-асфальтеновых фракций грунта, в качестве которого использовали термостойкое минеральное компрессорное масло марки К-19 (ГОСТ 1861–73), кинематическая вязкость которого составляет 17–21 мм<sup>2</sup>/с (при 100 °С). Компрессорное масло К-19 ( $\rho=0,885$  г/мл) получено из малосернистой нефти, содержит высокомолекулярные углеводороды, но не содержит присадок и имеет высокую

термоокислительную стабильность (работает при температуре до 160 °С).

Для разложения компрессорного масла К-19 использовали «Биоойл-АА» – биопрепарат для рекультивации нефтезагрязненных почв. Используемая форма препарата – 0,5 % раствор сухого порошка «Биоойл-АА». Раствор готовился непосредственно перед экспериментом, эксперименты проводили при температуре  $t=18-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и влажности грунтов не менее 40–50 %.

Результаты экспериментов при добавке биопрепарата «Биоойл-АА» в количестве 0,1 г/кг грунта представлены на рис. 4, 5.

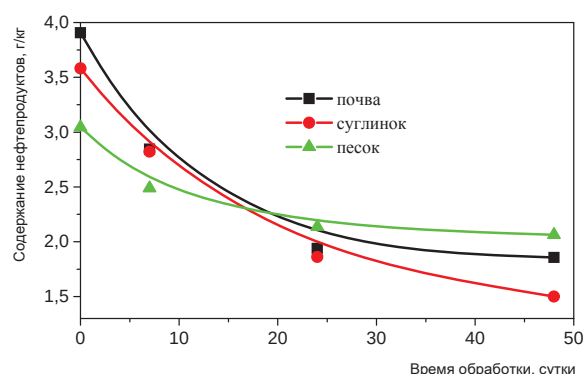


Рис. 4. Содержание нефтепродуктов (компрессорное масло К-19) в грунтах в процессе их ремедиации биопрепаратом «Биоойл-АА»

Fig. 4. Content of petroleum products (compressor oil K-19) in soils at their remediation with biopreparation «Biooil-AA»

За 48 суток произошло двукратное снижение содержания нефтепродуктов в почве и суглинке. При обработке биопрепаратом «Биоойл-АА» почвы и суглинка, загрязненных минеральным маслом, эффективность биоремедиации более высокая, чем при обработке песка, что, вероятно, обусловлено присутствием в почве и суглинке аборигенной углеводородокисляющей микрофлоры, способной к окислению нефтепродуктов [31].

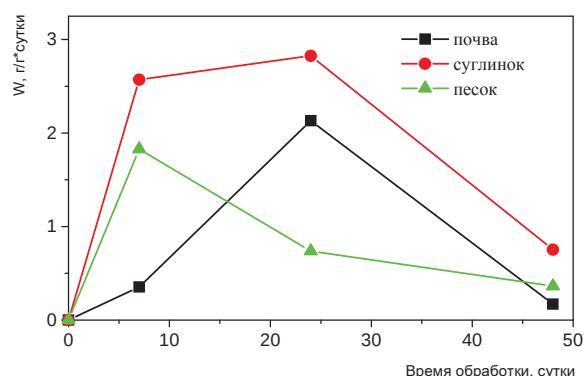


Рис. 5. Скорость биодеструкции нефтепродуктов (компрессорное масло К-19) в грунтах биопрепаратом «Биоойл-АА»

Fig. 5. Speed of biodegradation of petroleum products (compressor oil K-19) in soils with biopreparation «Biooil-AA»

### Миграция нефтепродуктов из загрязненного грунта в очищенный

После обработки биопрепаратом поверхностного слоя грунта, загрязненного нефтепродуктами, возникает градиент концентраций нефтепродуктов между верхним (очищенным) и нижним (загрязненным) слоями грунта, что способствует миграции нефтепродуктов под действием капиллярных сил. В работе [32] установлена восходящая миграция нефтепродуктов в слой экранирующего грунта за счет капиллярного поднятия.

Для оценки скорости подъема нефтепродуктов после очистки поверхностного слоя грунта и определения периодичности обработки грунтов биопрепаратом проведены эксперименты, в которых изучали скорость подъема уровня нефтепродукта (компрессорного масла К-19,  $\rho=0,885\text{ г/мл}$ ) по экранирующему грунту – суглинку, который моделирует грунты площадки Павельцевской нефтебазы.

Массоперенос компрессорного масла К-19 при загрязнении суглинка изучали на модельных системах, в которых уплотненный чистый воздушно-сухой суглинок контактировал со слоем суглинка, искусственно загрязненного компрессорным маслом К-19 (10–50 % об.), а также дополнительно увлажненного дистиллированной водой (увлажнение 100 % об.). Контактующие слои суглинка выдерживали в стеклянных колоннах-лизиметрах при комнатной температуре в течение двух месяцев. Уровень подъема компрессорного масла К-19 фиксировали визуально.

Установлено, что скорость подъема компрессорного масла К-19 в слое суглинка в этих условиях не превышает 4,3 см/год. Повышение влагосодержания грунта способствует увеличению скорости массопереноса компрессорного масла К-19 до 32,4 см/год, что согласуется с данными, полученными в работе [32].

### Схема комплексной рекультивации загрязненных грунтов Павельцевской нефтебазы

Одним из первоочередных природоохранных мероприятий при рекультивации грунтов нефтебаз считается ликвидация «плавающей» линзы жидких нефтепродуктов посредством их извлечения методом откачки. Извлеченные нефтепродукты могут компенсировать часть затрат на проведение рекультивационных работ [4].

Удаление остаточных нефтепродуктов из геологической среды может продолжаться длительное время – десятки лет [9]. В этой связи реальным является постоянная локализация очага загрязнения. Для предотвращения поступления нефтепродуктов в гидрографическую сеть необходимо создать гидравлическую завесу (дренажную систему) в зоне разгрузки грунтовых вод.

Таким образом, предлагается следующая последовательность технологических операций по рекультивации грунтов Павельцевской нефтеба-

зы, загрязненных нефтепродуктами и тяжелыми металлами:

- 1 этап – откачка линз нефтепродуктов с поверхности грунтовых вод;
- 2 этап – обработка поверхностного слоя грунта гуминовыми препаратами для иммобилизации тяжелых металлов, содержащихся в грунте;
- 3 этап – обработка поверхностного слоя грунта биопрепаратом, предназначенным для биоразложения нефтепродуктов (например, биопрепаратом «Биоил-АА»;
- 4 этап – размещение гидравлической завесы из откачных скважин (дренажная система) в зоне разгрузки грунтовых вод.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закруткин В.Е., Холодков Ю.И., Подольский А.Д. Экологические последствия эксплуатации нефтехранилищ в междуречье рек Дон и Сал // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. – 2007. – № 6. – С. 506–517.
2. Чепрасова А.С. Гидрогеологические условия формирования нефтяного загрязнения в приустьевой части долины реки Туапсе (Северный Кавказ) и пути улучшения экологического состояния геологической среды: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2012. – 21 с.
3. Гольдберг В.М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. – М.: Недра, 1984. – 262 с.
4. Кирий О.А. Экологическая оценка использования углеводородокисляющих бактерий при биоремедиации нефтезагрязненных почв и вод на юге России: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Ростов-на-Дону, 2013. – 20 с.
5. Чачина С.Б., Болтунова С.В., Черкашина Н.В. Деструкция углеводородов нефти с использованием микробиологических препаратов «Байкал-Эм», «Тамир», «Восток» // Омский научный вестник. – 2015. – № 1. – С. 221–225.
6. Чачина С.Б., Лапочкин А.С. Влияние микробиологических препаратов «Байкал Эм 1», «Тамир» и «Восток» на выживаемость и численность дождевых червей *Eisenia fetida* при загрязнении почвы высокими концентрациями нефти // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 6–3. – С. 512–514.
7. Сваровская Л.И., Алтунина Л.К., Ельчанинова Е.А. Биодеструкция ароматических соединений нефти, загрязняющей почву // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2015. – № 1. – С. 7–11.
8. Кржиж Л., Пашковский И.С. Нефтезагрязненные подземные воды: санация или самоочистка? // Экология производства. – 2007. – № 12. – С. 50–53.
9. Середин В.В. Санация территорий, загрязненных нефтью и нефтепродуктами // Геоэкология. – 2000. – № 6. – С. 525–540.
10. ПНД Ф 16.1.41–04. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах почв гравиметрическим методом. – М.: Изд-во МПР РФ, 2004. – 13 с.
11. Одинцова Т.А. Разработка технологии идентификации и мониторинга нефтяных загрязнений: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2010. – 214 с.
12. Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель (Утв. Роскомземом 28.12.1994, Минсельхозпродом РФ 26.01.1995, Минприроды РФ 15.01.1995).
13. Сиромля Т.И. Формы соединений свинца, кадмия и цинка в почва юга Западной Сибири // ВЕСТНИК Оренбургского государственного университета. – 2017. – № 12. – С. 26–29.

#### Заключение

В результате реализации предложенной схемы рекультивации грунтов площадки Павельцевской нефтебазы будут откачены нефтепродукты из линз, расположенных на поверхности грунтовых вод (уровень грунтовых вод 5,5–6,5 м), проведена иммобилизация тяжелых металлов в поверхностном слое грунта, что позволит прекратить их миграцию в грунтовые воды, будет резко снижено содержание нефтепродуктов в поверхностном слое грунта за счет биоразложения, прекращено поступление нефтепродуктов из зоны аэрации грунтов Павельцевской нефтебазы в пруд реки Безымянная в зоне разгрузки грунтовых вод.

14. Семенков И.Н. Формы нахождения металлов в суглинистых тундровых, таежных, подтаежных и лесостепных почвенно-геохимических катенах: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – М., 2016. – 24 с.
15. Ганев И.Г., Кулагин А.А. Ремедиация и рекультивация техногенно деградированных земель // ВЕСТНИК Оренбургского государственного университета. – 2009. – № 6. – С. 554–557.
16. Enhanced remediation of hydrocarbon contaminated desert soil fertilized with organic carbons / S.S. Radwan, D. Al-Mailem, I. El-Nemr, S. Salamah // International Biodeterioration & Biodegradation. – 2000. – V. 46. – № 2. – P. 129–132.
17. Bioremediation of a crude-oil polluted agricultural-soil at Port Harcourt, Nigeria / M.J. Ayotamuno, R.B. Kogbara, S.O.T. Oga-ji, S.D. Probert // Applied Energy. – 2006. – V. 83. – № 11. – P. 1249–1257.
18. Stevenson F.J. Organic matter reactions involving metal ions in soil. Ch. 16 // Humus Chemistry: Genesis, Composition and Reactions. 2<sup>nd</sup> ed. – New York: John Wiley & Sons, 1994.
19. Investigation of humic acid complexation behavior with uranyl ions using modified synthetic and natural humic acids / S. Pompe, K. Schmeide, M. Bubner, G. Geipel, K.H. Heise, G. Bernhard, H. Nitsche // Radiochimica Acta. – 2000. – V. 88. – P. 553–558.
20. Kim J.I., Czerwinski K.R. Complexation of Metal Ions with Humic Acid: Metal Ion Charge Neutralization Model // Radiochimica Acta. – 1996. – V. 73. – P. 5–10.
21. Stevenson F.J. Humus Chemistry. 1<sup>st</sup> ed. – New York: John Wiley & Sons, 1982.
22. Огняник Н.С., Парамонова Н.К., Брик А.Л. Основы изучения загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами. – Киев: АПН, 2006. – 278 с.
23. Gaffney J.S., Marley N.A., Clark S.B. Humic and Fulvic Acids. Isolation, Structure, and Environmental Role // ACS Symposium Series 651. – Washington, DC: American Chemical Society, 2–16 1996.
24. An Introduction to Humic Substances in Soil, Sediment and Water / G.R. Aiken, D.M. McKnight, R.L. Werhaw, P. MacCarthy // Humic Substances in Soil, Sediment and Water. – USA: John Wiley & Sons, 1985.
25. Synthesis and characterization of humic acids with specific functional properties / S. Sachs, K. Schmeide, V. Brendler, A. Křepelová, J. Mibus, G. Geipel, K.-H. Heise, G. Bernhard // Investigation of the Complexation and the Migration of Actinides and Non-radioactive Substances with Humic Acids under Geogenic Conditions: Complexation of Humic Acids with Actinides in the Oxidation State IV Th, U, Np. Forschungszentrum Rossendorf, Institute of Radiochemistry, Wissenschaftlich-Technische Berichte. FZR 399, 2004. – P. 3–19.
26. The Impact of Humic Substances as Remediation Agents to the Speciation Forms of Metals in Soil / J. Burlakovs, M. Klavins,

- L. Osinska, O. Purmalis // APCBEE Procedia 5. – 2013. – P. 192–196.
27. Kaschl A., Chen Y. Interactions of Humic Substances with Trace Metals and Their Stimulatory Effects on Plant Growth technology // Use of Humic Substances to Remediate Polluted Environments: From Theory to Practice. – Netherlands: Springer, 2005. – P. 83–113.
28. Использование углеуминовых препаратов для локализации урана и ртути в жидких и твердых производственных отходах предприятий ГК «РОСАТОМ» / Ю.В. Островский, Г.М. Заборцев, В.В. Цивелёв, А.В. Бабушкин, Д.Ю. Островский, Н.Б. Егоров, С.Н. Чегринцев // Химия в интересах устойчивого развития. – 2016. – Т. 24. – № 6. – С. 781–787.
29. Гречищева Н.Ю., Перминова И.В., Мещеряков С.В. Перспективность применения гуминовых веществ в технологиях очистки нефтезагрязненных почв // Экология и промышленность России. – 2016. – № 1. – С. 30–36.
30. Humic substances as electron acceptors for microbial respiration / D.R. Lovley, J.D. Coates, E.L. Blunt-Harris, E.J.P. Phillips, J.C. Woodward // Nature. – 1996. – № 382. – P. 445–448.
31. Журавлева А.С., Лабутова Н.М., Андронов Е.Е. Влияние нефтезагрязнения на микробоценоз почв, прилегающих к нефтеранилищу // Экологическая генетика. – 2017. – Т. 15. – № 1. – С.60–68.
32. Миграция нефтепродуктов из загрязненной почвы в насыпной изолирующий слой чистого песка / Е.Н. Федосеева, А.Д. Зорин, В.Ф. Занозина, Л.Е. Самсонова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2014. – Т. 22. – № 5. – С. 497–503.

Поступила 27.06.2018 г.

#### Информация об авторах

**Островский Ю.В.**, доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета; начальник научно-исследовательского отдела Новосибирского филиала АО «Государственный специализированный проектный институт».

**Заборцев Г.М.**, кандидат химических наук, начальник лаборатории научно-исследовательского отдела Новосибирского филиала АО «Государственный специализированный проектный институт».

**Черноок В.А.**, директор Новосибирского филиала АО «Государственный специализированный проектный институт».

**Крестинин А.А.**, начальник отдела комплексных инженерных изысканий АО «Государственный специализированный проектный институт».

UDC 504.064.47

## COMPREHENSIVE RECULTIVATION OF SOILS OF THE PAVELTSEVSKAYA TANK FARM

Yury V. Ostrovsky<sup>1,2</sup>,

ostrovskij@corp.nstu.ru, YuVOstrovskiy@aogspi.ru

Grigory M. Zabortsev<sup>2</sup>,

GMZaborcev@aogspi.ru

Vladislav A. Chernook<sup>2</sup>,

VACHernook@aogspi.ru

Afanasy A. Krestinin<sup>3</sup>,

AAKrestinin@aogspi.ru

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University,  
20, Karl Marks avenue, Novosibirsk, 630073, Russia.

<sup>2</sup> Novosibirsk Branch of JSC «State Specialized Design Institute»,  
2, B. Khmel'nitsky street, Novosibirsk, 630075, Russia.

<sup>3</sup> JSC «State Specialized Design Institute»,  
4, bld. 1A, Sharikopodshipnikovskaya street, Moscow, 115088, Russia.

**Relevance.** Quaternary (QII–IV) deposits are represented in geological structure of the investigated section within a depth of 20.0 m: cover, lake-glacial, fluvioglacial, sandy-argillaceous Dnieper-Moscow interglacial; Morainic clayey of the Moscow and Dnieper stages of glaciation; fluvioglacial sands of the Oxo-Dnieper interglaciation. These primers composing Paveltsevska tank farm pad (Dolgoprudny Moscow region) operating since 50-s of the XX century, are contaminated to a greater or lesser extent with petroleum products and heavy metals (lead, copper, zinc, cadmium, nickel). Owing to spills the oil products have leaked into the ground and reached the groundwater level (5.5–6.5 m) and formed in the areas of spreading lenses and interlayers of sandy soils of varying size in the clay thicker the floating lens of a mixture of gasoline and diesel fuel with output power of 0.2 up to 0.4 m. The significant pollution with oil products of the Bezmyannaya river water was found out. The river forms the pond before flowing into the Klyazma reservoir. The pond adjoins to the tank farm territory that can be related to discharge of oil product lenses into the pond.

**The aim** of the research is to develop an optimal scheme of remediation of oil-contaminated quaternary sand-clay soils forming the platform of the Paveltsevska tank farm based on the results of geological and engineering and environmental studies, including laboratory geochemical studies.

**Methods:** geotechnical studies of soils – drilling wells, laboratory geoeological studies of soil samples, monitoring of groundwater level, determination of the effect of biological preparations on degradation of oil products and humic preparations on the mobility of heavy metal ions in soils, ground waters of an overmoist aquifer in fluvioglacial piano- argillaceous sediments Dneprovsko-Moscow interglaciation and groundwater podmorennogo (nadyurskogo) aquifer during flyuvioglacial sandy deposits of the Oka-Dnepr Interglacial.

**Results.** The authors have proposed the scheme for complex remediation of contaminated soils at the site of the Paveltsevska tank farm, including pumping out lenses of petroleum products, immobilization of heavy metals in soils using humic preparations («Energen Extra»), destruction of petroleum products by biological preparations (BIOIL-AA, FBUN SSC VB «Vector»; Novosibirsk) and installation of a hydraulic curtain (drainage). Implementation of the proposed scheme will allow extracting petroleum products, immobilizing heavy metals in the surface layer of the soil, reducing considerably the content of petroleum products in it and the flow of petroleum products from the aeration zone of the Paveltsevska tank farm into the basin of the Bezmyannaya river in the groundwater discharge zone.

### Key words:

Tank farm, soil contamination, oil products, heavy metals, remediation, humic preparations, biological products, lenses of oil products, hydraulic curtain.

### REFERENCES

1. Zakrutkin V.E., Kholodkov Yu.I., Podolsky A.D. Ecological consequences of oil storage in the interfluvium of the Don and Sal rivers. *Geocology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*, 2007, no. 6, pp. 506–517. In Rus.
2. Cheprasova A.S. *Gidrogeologicheskie usloviya formirovaniya neftyanogo zagryazneniya v priust'evoy chasti doliny reki Tuapse (Severnyy Kavkaz) i puti uluchsheniya ekologicheskogo sostoyaniya geologicheskoy sredy*. Avoereferat Dis. Kand. nauk [Hydrogeological conditions for the formation of oil pollution in the mouth of the Tuapse River valley (the North Caucasus) and ways to improve the ecological state of the geological environment. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2012. 21 p.
3. Goldberg V.M., Gazda S. *Gidrogeologicheskie osnovy okhrany podzemnykh vod ot zagryazneniya* [Hydrogeological basis for protection of groundwater from pollution]. Moscow, Nedra Publ., 1984, 262 p.
4. Kirii O.A. *Ekologicheskaya otsenka ispol'zovaniya uglevodorodokislyayushchikh bakteriy pri bioremediatsii neftezagryaznennykh pochv i vod na yuge Rossii*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Ecological assessment of the use of hydrocarbon-oxidizing bacteria with bioremediation of oil-contaminated soil and water in the south of Russia. Cand. Diss. Abstract]. Rostov-on-Don, 2013. 20 p.
5. Chachina S.B., Boltunova S.V., Cherkashina N.V. Destruction of oil hydrocarbons using microbiological preparations «Baikal-Em», «Tamir», «Vostok». *Omsk Scientific Bulletin*, 2015, no. 1, pp. 221–225. In Rus.
6. Chachina S.B., Lapochkin A.S. Influence of microbiological preparations «Baikal Em 1», «Tamir» and «Vostok» on the survival rate and number of earthworms *Eisenia fetida* in soil contamination

- with high concentrations of oil. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, no. 6–3, pp. 512–514. In Rus.
7. Svarovskaya L.I., Altunina L.K., Elchaninova E.A. Biodegradation of aromatic compounds of oil polluting the soil. *Protection of the environment in the oil and gas complex*, 2015, no. 1, pp. 7–11. In Rus.
  8. Krzhizh L., Pashkovskiy I.S. Oil polluted underground water: sanitation or self-cleaning? *Ecology production*, 2007, no. 12, pp. 50–53. In Rus.
  9. Seredin V.V. Sanitation of territories contaminated with oil and oil products. *Geoecology*, 2000, no. 6, pp. 525–540. In Rus.
  10. PND F 16.1.41–04. *Kolichestvenny khimicheskiy analiz pochv. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy kontsentratsii nefteproduktov v probakh pochv gravimetricheskim metodom* [Quantitative chemical analysis of soils. Method for performing measurements of mass concentration of petroleum products in soil samples by gravimetric method]. Moscow, MPR RF publ., 2004. 13 p.
  11. Odintsova T.A. *Razrabotka tekhnologii identifikatsii i monitoringa neftyanykh zagryazneniy*. Dis. Kand. nauk [Development of technology for identification and monitoring of oil pollution. Cand. Diss.]. Perm, 2010. 214 p.
  12. *Metodicheskie rekomendatsii po vyvazheniyu degradirovannykh i zagryaznennykh zemel* [Guidelines for identification of degraded and contaminated land]. (Approved. Roskomzemom 28.12.1994, the Ministry of Agriculture of the Russian Federation 26.01.1995, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation 15.01.1995).
  13. Siromlay T.I. Forms of compounds of lead, cadmium and zinc in soil of south Western Siberia. *Messenger Orenburg state university*, 2017, no. 12, pp. 26–29. In Rus.
  14. Semenov I.N. *Formy nakhozhdeniya metallov v suglinistykh tundrovyykh, taezhnykh, podtaezhnykh i lesostepnykh poshvenno-geokhimicheskikh katenakh*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Forms of finding metal in loamy, tundra, taiga and forest steppe soil-geochemical catens. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2016. 24 p.
  15. Ganeev I.G., Kulagin A.A. Remediation and Reclamation of Technogenically Degraded Lands. *Vestnik Orenburg State University*, 2009, no. 6, pp. 554–557. In Rus.
  16. Radwan S.S., Al-Mailem D., El-Nemr I., Salamah S. Enhanced remediation of hydrocarbon contaminated desert soil fertilized with organic carbons. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2000, vol. 46, no. 2, pp. 129–132.
  17. Ayotamuno M.J., Kogbara R.B., Ogaji S.O.T., Probert S.D. Bioremediation of a crude-oil polluted agricultural-soil at Port Harcourt, Nigeria. *Applied Energy*, 2006, V. 83, no. 11, pp. 1249–1257.
  18. Stevenson F.J. Organic matter reactions involving metal ions in soil. Ch. 16. *Humus Chemistry: Genesis, Composition and Reactions*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, John Wiley & Sons, 1994.
  19. Pompe S., Schmeide K., Bubner M., Geipel G., Heise K.H., Bernhard G., Nitsche H. Investigation of humic acid complexation behavior with uranyl ions using modified synthetic and natural humic acids. *Radiochimica Acta*, 2000, vol. 88, pp. 553–558.
  20. Kim J.I., Czerwinski K.R. Complexation of Metal Ions with Humic Acid: Metal Ion Charge Neutralization Model. *Radiochimica Acta*, 1996, vol. 73, pp. 5–10.
  21. Stevenson F.J. *Humus Chemistry*. 1<sup>st</sup> ed. New York, John Wiley & Sons, 1982.
  22. Ognyanik N.S., Paramonova N.K., Briks A.L. *Osnovy izucheniya zagryazneniya geologicheskoy sredy legkimi nefteproduktami* [Basics of studying the pollution of the geological environment with light petroleum products]. Kiev, APN Publ., 2006. 278 p.
  23. Gaffney J.S., Marley N.A., Clark S.B. Humic and Fulvic Acids. Isolation, Structure, and Environmental Role. *ACS Symposium Series 651*. Washington, DC, American Chemical Society, 1996. pp. 2–16.
  24. Aiken G.R., McKnight D.M., Werhaw R.L., MacCarthy P. An Introduction to Humic Substances in Soil, Sediment and Water. *Humic Substances in Soil, Sediment and Water*. USA, John Wiley & Sons, 1985.
  25. Sachs S., Schmeide K., Brendler V., Křepelová A., Mibus J., Geipel G., Heise K.-H., Bernhard G. Synthesis and characterization of humic acids with specific functional properties. *Investigation of the Complexation and the Migration of Actinides and Non-radioactive Substances with Humic Acids under Geogenic Conditions: Complexation of Humic Acids with Actinides in the Oxidation State IV Th, U, Np*. Forschungszentrum Rossendorf, Institute of Radiochemistry, Wissenschaftlich-Technische Berichte. FZR 399, 2004, pp. 3–19.
  26. Burlakovs J., Klavins M., Osinska L., Purmalis O. The Impact of Humic Substances as Remediation Agents to the Speciation Forms of Metals in Soil. *APCBEE Procedia* 5, 2013, pp. 192–196.
  27. Kaschl A., Chen Y. Interactions of Humic Substances with Trace Metals and Their Stimulatory Effects on Plant Growth technology. *Use of Humic Substances to Remediate Polluted Environments: From Theory to Practice*. Netherlands, Springer, 2005. pp. 83–113.
  28. Ostrovsky Yu.V., Zabortsev G.M., Tsivelev V.V., Babushkin A.V., Ostrovsky D.Yu., Egorov N.B., Chegrintsev S.N. Use of coal humic preparations for the localization of uranium and mercury in liquid and solid industrial wastes of enterprises of the State Corporation «ROSATOM». *Chemistry for Sustainable Development*, 2016, vol. 24, no. 6, pp. 781–787. In Rus.
  29. Grechischeva N.Yu., Perminova I.V., Meshcheryakov S.V. Prospectivity of the use of humic substances in cleaning technologies for oil-contaminated soils. *Ecology and industry of Russia*, 2016, no. 1, pp. 30–36. In Rus.
  30. Lovley D.R., Coates J.D., Blunt-Harris E. L., Phillips E.J.P., Woodward J.C. Humic substances as electron acceptors for microbial respiration. *Nature*, 1996, no. 382, pp. 445–448.
  31. Zhuravleva A.S., Labutova N.M., Andronov E.E. Influence of oil pollution on the microbiocenosis of soils adjacent to the oil storage. *Ecological genetics*, 2017, vol. 15, no. 1, pp. 60–68. In Rus.
  32. Fedoseeva E.N., Zorin A.D., Zanozina V.F., Samsonova L.E. Migration of oil products from contaminated soil to a loose insulating layer of clean sand. *Chemistry for Sustainable Development*, 2014, vol. 22, no. 5, pp. 497–503. In Rus.

Received: 27 June 2018.

#### Information about the authors

**Yury V. Ostrovsky**, Dr. Sc., professor, Novosibirsk State Technical University, head of the Research Department, Novosibirsk Branch of JSC «State Specialized Design Institute».

**Grigory M. Zabortsev**, Cand. Sc., head of the Laboratory, the Research Department of the Novosibirsk Branch of JSC «State Specialized Design Institute».

**Vladislav A. Chernook**, Director, Novosibirsk Branch of JSC «State Specialized Design Institute».

**Afanasy A. Krestinin**, head of the Integrated Engineering Survey Department, JSC «State Specialized Design Institute».

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректura и перевод на английский язык** *С.В. Жаркова*  
**Дизайн обложки** *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива  
*Валерия Касаткина*

Руководство для авторов и образец оформления статьи: [izvestiya.tpu.ru](http://izvestiya.tpu.ru)

Подписано к печати хх.06.2019. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 25,59. Уч.-изд. л. 23,14.  
Заказ ххх-19. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ