

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 329, № 9, 2018

**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)  
Зиатдинов 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)  
Кирыанова 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, 2018

**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 геологических объектов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке георесурсов, 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 329, № 9, 2018

**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)  
Belozеров 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 Communications).

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

- Математическая модель инъекции сероводорода в пласт, частично насыщенный водой**  
Хасанов М.К. 6
- Методические аспекты прогноза и поисков крупнообъемных золоторудных месторождений на примере Енисейского Кряжа**  
Мансуров Р.Х. 15
- Печь кипящего слоя для обжига цинковых концентратов как объект регулирования**  
Ивакина С.А., Муниц В.А. 31
- Подходы к созданию геоинформационных моделей городских территорий для учета экологической составляющей при ведении единого государственного реестра недвижимости**  
Трубина Л.К., Аврунев Е.И., Николаева О.Н., Каленицкий А.И., Антипов И.Т. 43
- Определение термодинамической эффективности реакторов частичного окисления энергохимических установок**  
Мракин А.Н., Николаев Ю.Е., Сотников Д.Г., Табакаев Р.Б., Селиванов А.А. 52
- Структура асфальтенов нефтей различной химической природы**  
Чешкова Т.В., Сергун В.П., Коваленко Е.Ю., Сагаченко Т.А., Мин Р.С. 61
- К вопросу о переходе тепловых электрических станций с традиционных топлив на органоугольные топливные композиции**  
Курганкина М.А., Вершинина К.Ю., Озерова И.П., Медведев В.В. 72
- Фоновые показатели эколого-геохимического состояния вод верховых болот в таежной зоне на территории Российской Федерации**  
Потапова Т.М., Марков М.Л., Носаль А.П., Савичев О.Г. 83
- Исследование процесса струйного размыва донных отложений в нефтяных резервуарах**  
Бутов В.Г., Никульчиков А.В., Никульчиков В.К., Солоненко В.А., Ящук А.А. 93
- Изменения химического состава кислотных вытяжек по глубине торфяной залежи внутриболотных экосистем Васюганского болота (Западная Сибирь)**  
Савичев О.Г., Мазуров А.К., Рудмин М.А., Хвашевская А.А., Даулетова А.Б. 101
- Влияние внутрискважинного компенсатора на падение напряжения в элементах электротехнического комплекса добывающей скважины**  
Копырин В.А., Смирнов О.В., Портнягин А.Л., Хамитов Р.Н. 117
- Очистка циркония от гафния из фторидных расплавов с щелочными металлами**  
Русаков И.Ю., Софронов В.Л., Макаеев Ю.Н. 125
- Гидрогеологические условия нарыкско-осташкинской площади Ерунаковского района Кузбасса**  
Домрочева Е.В., Кузеванов К.И., Гридасов А.Г., Сизиков Д.А. 134
- Ухудшение ситуации с подтоплением, связанное с антропогенным влиянием на примере города Тюкалинска**  
Медведков К.С., Штриплинг Л.О. 143
- Региональная инженерная оценка рельефа района прохождения проектируемого газопровода в Саратовской области**  
Черноморец Л.С. 153
- Обеззараживание и использование антропогенных отходов в ресурсосберегающих строительных технологиях**  
Маковкин В.И., Замятин Н.В., Смирнов Г.В. 164

## CONTENTS

- Mathematical model of hydrogen sulfide injection into a reservoir partially saturated with water**  
Khasanov M.K. 6
- Methodical aspects of forecasting and prospecting for large-volume gold deposits on the example of the Yenisei Ridge**  
Mansurov R.Kh. 15
- Fluidized bed furnace for roasting zinc concentrates as a control object**  
Ivakina S.A., Munts V.A. 31
- Approaches to geoinformation modelling of urban territory to integrate the environmental component into the system of state real property cadastre**  
Trubina L.K., Avrunev E.I., Nikolaeva O.N., Kalenitsky A.I., Antipov I.T. 43
- Determination of thermodynamic efficiency of partial oxidation reactors of energy-chemical installations**  
Mrakin A.N., Nikolaev Yu.E., Sotnikov D.G., Tabakaev R.B., Selivanov A.A. 52
- Structure of asphaltenes occurring in oils of different chemical nature**  
Cheshkova T.V., Sergun V.P., Kovalenko E.Yu., Sagachenko T.A., Min R.S. 61
- Thermal power plants switching from traditional fuels to coal water slurries containing petrochemicals**  
Kurgankina M.A., Vershinina K.Yu., Ozerova I.P., Medvedev V.V. 72
- Background parameters of ecological and geochemical condition of waters of oligotrophic bogs in the taiga zone in the Russian Federation**  
Potapova T.M., Markov M.L., Nosal A.P., Savichev O.G. 83
- Simulation study of bottom sediments jet erosion in oil tank**  
Butov V.G., Nikulchikov A.V., Nikulchikov V.K., Solonenko V.A., Yashchuk A.A. 93
- Changes in chemical composition of acid extracts on depth of peat deposit of the Vasyugan mire ecological systems (Western Siberia)**  
Savichev O.G., Mazurov A.K., Rudmin M.A., Hvashevskaya A.A., Dauletova A.B. 101
- Influence of downhole compensator on voltage drop in elements of a production well electrical system**  
Kopyrin V.A., Smirnov O.V., Portnyagin A.L., Khamitov R.N. 117
- Zirconium purification from hafnium from fluoride melts with alkaline metals**  
Rusakov I.Yu., Sofronov V.L., Makaseev Yu.N. 125
- Hydrogeological conditions of Naryk-Ostashkin area in Erunakovo region in Kuzbass**  
Domrocheva E.V., Kuzevanov K.I., Gridasov A.G., Sizikov D.A. 134
- Degradation of flooding situation related to anthropogenic effects on the example of Tyukalinsk**  
Medvedkov K.S., Shtripling L.O. 143
- Regional engineering assessment of the relief of the projected gas pipeline area passage in Saratov region**  
Chernomorets L.S. 153
- Disinfection and usage of anthropogenic waste in resource-saving construction technologies**  
Makovkin V.I., Zamyatin N.V., Smirnov G.V. 164

УДК 622.279.72

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЖЕКЦИИ СЕРОВОДОРОДА В ПЛАСТ, ЧАСТИЧНО НАСЫЩЕННЫЙ ВОДОЙ

Хасанов Марат Камилович,  
hasanovmk@mail.ru

Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,  
Россия, 453103, г. Стерлитамак, пр. Ленина, 37.

**Актуальность** исследования связана с разработкой теоретических основ технологий подземного захоронения вырабатываемого промышленными объектами сероводорода с целью снижения его эмиссии в атмосферу. Рассматривается метод утилизации сероводорода в газогидратном состоянии, в котором одинаковое количество газа может храниться при значительно меньших значениях давления.

**Целью** исследования является выяснение особенностей протекания процесса образования газового гидрата  $H_2S$  при инжекции жидкого сероводорода в пористый резервуар.

**Объект:** пористый пласт, насыщенный нефтью и водой, исходное давление которого ниже равновесного давления образования газогидрата сероводорода.

**Методы исследования.** На основе уравнений механики сплошной среды построена математическая модель тепломассопереноса в природном пласте, сопровождающегося образованием газогидрата сероводорода. Принято, что в рассматриваемом случае в пласте возникают три характерные зоны и соответственно два подвижных межфазных фронта – между первой и второй зонами, где происходит полный переход воды в газогидратное состояние (фронт гидратообразования), и между второй и третьей зонами, где осуществляется вытеснение нефти сероводородом (фронт вытеснения). Методом сведения к автомоделной переменной построены аналитические решения для безразмерных значений давления и температуры в каждой из трех областей пласта. Исследованы зависимости координаты и температуры межфазных границ от температуры закачиваемого сероводорода и исходной температуры пласта.

**Результаты.** Установлено, что с повышением начальной температуры пласта и температуры инжектируемого жидкого сероводорода координата фронта образования газогидрата  $H_2S$  уменьшается, а температура фронта вытеснения нефти сероводородом увеличивается. Показано, что при достаточно низких значениях температуры пласта и инжектируемого сероводорода может происходить выравнивание координат фронтов гидратообразования и вытеснения. На плоскости параметров «температура инжекции – начальная температура пласта» построены карты решений, т. е. критические диаграммы, определяющие существование режима, при котором фронт вытеснения нефти сероводородом опережает фронт образования газогидрата  $H_2S$ .

### Ключевые слова:

Математическая модель, автомоделное решение, пористая среда, фильтрация, газогидраты, сероводород.

### Введение

Сероводород, принадлежащий к классу высокоопасных ядовитых загрязняющих веществ, является одним из основных отходов нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятий. В настоящее время сероводород относится к числу выбросов, вносящих наиболее существенный вклад в показатель «категория опасности предприятия», т. е. интегральный показатель, характеризующий изменения качества атмосферы через выбросы, учитывающий класс опасности вещества и оценивающий объем воздуха, необходимый для разбавления выбросов над территорией предприятия до уровня ПДК. Одним из методов снижения эмиссии в атмосферу сероводорода, вырабатываемого объектами промышленности, является его подземное захоронение в истощенных нефтяных коллекторах [1–4]. Поскольку при долгосрочном подземном хранении утилизируемых выбросов в виде флюида возникает риск их утечки на поверхность, некоторые авторы предлагают переводить их газогидратное состояние, в котором одинаковое количество газа может храниться при значительно меньших значениях давления [5–8].

Результаты экспериментального исследования образования газогидратов в пористых средах при-

ведены, в частности, в работах [9–13]. В этих и других экспериментальных работах исследования образования газогидрата проводились в образцах небольшого размера. Поэтому в данных исследованиях процесс гидратообразования вследствие малых размеров образцов пористой среды лимитируется кинетическими механизмами (диффузией газа через пленки воды и газогидрата). Однако в случае природных протяженных пластов процесс гидратообразования лимитируется не кинетикой процесса, а фильтрацией и теплопереносом в пористой среде. Поэтому актуальным является построение математических моделей образования газогидратов в проницаемых пластах, учитывающих теплоперенос в пласте.

В настоящее время при численном моделировании процессов фильтрации и теплопереноса в пористом пласте, сопровождающихся образованием газогидрата, как правило, используются уравнения механики многофазных сред [14]. Математические модели гидратообразования в протяженных пористых пластах при закачке газа в пористую среду в исходном состоянии, насыщенную метаном и водой (льдом), сформулированы, в частности, в работах [15–19]. Математическая модель образования газогидрата  $H_2S$  в пласте, насы-

щенном нефтью и водой, при инъекции жидкого сероводорода представлена в работе [20]. Однако в этой работе задача решена в наиболее простой постановке, когда образование газогидрата  $H_2S$  происходит на поверхности, совпадающей с поверхностью вытеснения нефти сероводородом. Поэтому в работе [20] предполагалось, что в пласте возникают только две характерные зоны и соответственно одна межфазная подвижная граница. В настоящей работе построена математическая модель образования газогидрата сероводорода для случая, когда гидратообразование происходит на фронтальной поверхности, которая не совпадает с поверхностью вытеснения нефти жидким сероводородом. Иными словами, рассматривается случай, когда в пласте возникают три характерные зоны и соответственно две межфазные подвижные границы.

#### Постановка задачи

Условия существования газового гидрата  $H_2S$  показаны на рис. 1 [7].

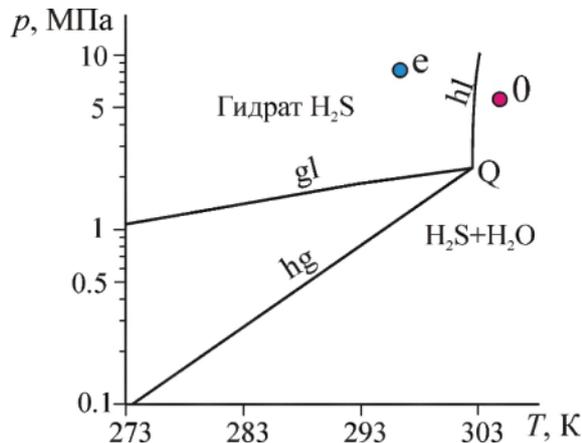


Рис. 1. Фазовая диаграмма системы «вода–сероводород»

Fig. 1. Phase diagram of the «water–hydrogen sulfide» system

На рисунке кривая  $hg$  определяет равновесие между газообразным сероводородом, водой и газогидратом, кривая  $hl$  – равновесие между жидким сероводородом, водой и газогидратом, а кривая  $gl$  – двухфазное равновесие между газообразным и жидким сероводородом. Газогидрат  $H_2S$  стабильно существует в области, лежащей левее кривых  $hg$  и  $hl$ . В квадрупольной точке  $Q$  ( $p_q=2,24$  МПа и  $T_q=302,6$  К) вода, газогидрат  $H_2S$ , газообразный и жидкий сероводород находятся в равновесии.

Будем полагать, что поры полубесконечного пласта (который занимает полупространство  $x>0$ ) в момент времени  $t=0$  насыщены нефтью и водой. При этом исходная температура пласта  $T_0$  выше температуры  $T_q$ , соответствующей квадрупольной точке, т. е. исходное состояние пласта не соответствует условиям существования газогидрата  $H_2S$  (точка 0 на рис. 1). Пусть через левую границу пласта ( $x=0$ ) закачивается сероводород в жидком состоянии, температура  $T_e$  и давление  $p_e$  которого

соответствуют условиям стабильного существования газогидрата  $H_2S$  (точка  $e$  на рис. 1).

В данной работе будем рассматривать случай, когда значение исходной водонасыщенности пласта не превышает 0,2 (т. е. воду можно считать неподвижной), а также модель с поршневым вытеснением нефти жидким сероводородом. Также будем рассматривать масштабы времени, значительно превышающие характерное время кинетики процесса образования гидрата  $H_2S$ . Учитывая, что начальное состояние пласта не соответствует условиям существования газогидрата  $H_2S$ , будем полагать, что гидратообразование происходит на фронтальной поверхности, которая не совпадает с поверхностью вытеснения нефти сероводородом. Следовательно, в рассматриваемом случае в пористом пласте образуются три характерные зоны. В первой (ближней) зоне поры насыщены сероводородом и газогидратом, во второй (промежуточной) зоне – сероводородом и водой, а в третьей (дальней) зоне – нефтью и водой. При этом образуются две подвижные межфазные поверхности: фронт гидратообразования (между первой и второй зонами) и фронт вытеснения нефти сероводородом (между второй и третьей зонами).

#### Основные уравнения

Система уравнений, описывающая процессы теплопереноса и фильтрации в проницаемом пласте, для рассматриваемой задачи запишется следующим образом [14–20]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \phi S_i) = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho_i u_i),$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \rho_i c_i u_i \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (1)$$

$$u_i = -\frac{k_i}{\mu_i} \frac{\partial p}{\partial x},$$

$$k_i = k_0 S_i,$$

$$\rho_i = \rho_{0i} \exp(\beta_i (p - p_0)).$$

Здесь  $x$  – координата;  $t$  – время;  $p$  – давление;  $T$  – температура;  $\phi$  – пористость; нижние индексы  $i=l, s$  относятся соответственно к параметрам нефти и жидкого сероводорода;  $\rho_i$  – плотность;  $k_i$  – фазовая проницаемость;  $k_0$  – абсолютная проницаемость;  $u_i$  – скорость фильтрации;  $c_i$  – удельная теплоемкость;  $\mu_i$  – динамическая вязкость;  $\beta_i$  – коэффициент сжимаемости;  $S_{(i)}$  – насыщенность пор;  $\lambda$  и  $\rho c$  – эффективные значения коэффициента теплопроводности и объемной теплоемкости пласта. В дальнейшем  $\lambda$  и  $\rho c$  будем считать постоянными величинами, т. к. основной вклад в их значения вносят соответствующие параметры горной породы.

Поскольку на поверхности  $x=x_0$ , разделяющей первую и вторую зоны, происходит переход воды и сероводорода в газогидратное состояние, то из условий баланса тепла и массы сероводорода на этой поверхности следует:

$$\begin{aligned} & -\left(k_s \frac{\partial p}{\partial x}\right)_b^- + \left(k_s \frac{\partial p}{\partial x}\right)_b^+ = \\ & = \mu_s \phi S_h \left( \frac{\rho_h G}{\rho_{0s}} + \frac{\rho_h (1-G)}{\rho_w} - 1 \right) V_b, \\ & \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_b^- - \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_b^+ = \phi \rho_h S_h L_h V_b. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $V_b$  – скорость движения фронта образования газогидрата  $H_2S$ ;  $\rho_w$  – плотность воды;  $S_{w0}$  – начальная водонасыщенность;  $G$  – массовая концентрация сероводорода в гидрате;  $L_h$  – удельная теплота образования газогидрата  $H_2S$ . Нижний индекс  $f$  относится к параметрам на поверхности, разделяющей первую и вторую зоны. Верхние индексы «-» и «+» относятся к значениям величин, терпящих разрыв на поверхности  $x=x_b$ , соответственно за фронтом образования гидрата  $H_2S$  (т. е. со стороны первой зоны) и перед данным фронтом (т. е. со стороны второй зоны). Температуру на этой поверхности будем полагать равной температуре квадрупольной точки  $T_Q$ .

Учитывая, что на данной поверхности выполняется также условие баланса массы воды:

$$\phi \rho_h S_h (1-G) V_b = \phi \rho_w S_{w0} V_b,$$

для величины насыщенности пор газогидратом  $H_2S$  в первой зоне имеем:

$$S_h = \frac{\rho_w}{\rho_h (1-G)} S_{w0}.$$

Поскольку на поверхности  $x=x_f$ , разделяющей вторую и третью области, происходит вытеснение нефти сероводородом, с учетом условий баланса массы нефти и сероводорода, а также баланса тепла на этой границе имеем:

$$\begin{aligned} & -\left(k_s \frac{\partial p}{\partial x}\right)_f^- = \mu_s \phi (1-S_{w0}) V_f, \\ & -\left(k_l \frac{\partial p}{\partial x}\right)_f^+ = \mu_l \phi (1-S_{w0}) V_f, \\ & \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_f^- - \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)_f^+ = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $V_f$  – скорость движения фронта вытеснения нефти сероводородом. Нижний индекс  $f$  относится к параметрам на поверхности, разделяющей вторую и третью зоны. Верхние индексы «-» и «+» относятся к значениям величин, терпящих разрыв на поверхности  $x=x_f$ , соответственно за фронтом вытеснения нефти сероводородом (т. е. со стороны второй зоны) и перед данным фронтом (т. е. со стороны третьей зоны).

Поскольку значения коэффициентов сжимаемости жидкого сероводорода и нефти имеют порядок  $10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ , при перепадах давления в пласте порядка 1 МПа имеем:  $\beta_i(p-p_0) \ll 1$ , т. е. нефть и сероводород можно считать слабосжимаемыми жид-

костями. Тогда, введя безразмерные параметры  $P=p/p_0$  и  $\theta=T/T_0$ , на основе (1) получим:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P_j}{\partial t} = \chi_j^{(p)} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial P_j}{\partial x} \right), \quad (j=1,2,3), \\ & \frac{\partial \theta_j}{\partial t} = \chi_j^{(T)} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial \theta_j}{\partial x} \right) + \gamma_j \chi_j^{(T)} \frac{\partial P_j}{\partial x} \frac{\partial \theta_j}{\partial x}, \quad (j=1,2,3), \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} \chi_1^{(p)} &= \chi_2^{(p)} = \frac{k_0}{\phi \mu_s \beta_s}, \quad \chi_3^{(p)} = \frac{k_0}{\phi \mu_l \beta_l}, \quad \chi^{(T)} = \frac{\lambda}{\rho c}, \\ \gamma_1 &= \frac{k_0 (1-S_h) \rho_{0s} c_s}{\mu_s \beta_s p_0 \lambda}, \quad \gamma_2 = \frac{k_0 (1-S_{w0}) \rho_{0k} c_s}{\mu_s \beta_s p_0 \lambda}, \\ \gamma_3 &= \frac{k_0 (1-S_{w0}) \rho_{0l} c_l}{\mu_l \beta_l p_0 \lambda}. \end{aligned}$$

Нижние индексы  $j=1,2,3$  относятся к параметрам ближней, промежуточной и дальней зон соответственно.

#### Автомодельное решение

Введем автомодельную переменную  $\xi = x/\sqrt{\chi^{(T)} t}$ . Тогда уравнения (4) в каждой области примут вид:

$$\begin{aligned} & -\xi \frac{dP_j}{d\xi} = 2\eta_j \frac{d}{d\xi} \left( \frac{dP_j}{d\xi} \right), \quad (j=1,2,3), \\ & -\xi \frac{d\theta_j}{d\xi} = 2 \frac{d}{d\xi} \left( \frac{d\theta_j}{d\xi} \right) + 2\gamma_j \frac{dP_j}{d\xi} \frac{d\theta_j}{d\xi}, \quad (j=1,2,3), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\eta_j = \chi_j^{(p)}/\chi^{(T)}$ .

После интегрирования (5) решения для безразмерных значений давления и температуры в каждой из зон могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_b + (P_e - P_b) \frac{\int_{\xi_b}^{\xi_b} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_1}\right) d\xi}{\int_0^{\xi_b} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_1}\right) d\xi}, \\ \theta_1 &= \theta_b + (\theta_e - \theta_b) \frac{\int_{\xi_b}^{\xi_b} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - 2\gamma_1 P_1\right) d\xi}{\int_0^{\xi_b} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - 2\gamma_1 P_1\right) d\xi}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P_2 &= P_f + (P_b - P_f) \frac{\int_{\xi_f}^{\xi_f} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_2}\right) d\xi}{\int_{\xi_b}^{\xi_f} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_2}\right) d\xi}, \\ \theta_2 &= \theta_f + (\theta_b - \theta_f) \frac{\int_{\xi_f}^{\xi_f} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - 2\gamma_2 P_2\right) d\xi}{\int_{\xi_b}^{\xi_f} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - 2\gamma_2 P_2\right) d\xi}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$P_3 = 1 + (P_f - 1) \frac{\int_{\xi_f}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_3}\right) d\xi}{\int_{\xi_f}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_3}\right) d\xi},$$

$$\theta_3 = 1 + (\theta_f - 1) \frac{\int_{\xi_f}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - 2\gamma_3 P_3\right) d\xi}{\int_{\xi_f}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - 2\gamma_3 P_3\right) d\xi}. \quad (8)$$

На основе соотношений (2) с учетом решений (6), (7) получим уравнения для определения координаты поверхности гидратообразования  $\xi_b$  и значений параметров на нем:

$$k_{s2} \frac{(P_f - P_b) \exp\left(-\frac{\xi_b^2}{4\eta_2}\right)}{\int_{\xi_b}^{\xi_f} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_2}\right) d\xi} -$$

$$-k_{s1} \frac{(P_b - P_e) \exp\left(-\frac{\xi_b^2}{4\eta_1}\right)}{\int_0^{\xi_b} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_1}\right) d\xi} = A\xi_b, \quad (9)$$

$$\frac{(\theta_b - \theta_e) \exp\left(-\frac{\xi_b^2}{4} - 2\gamma_1 P_b\right)}{\int_0^{\xi_b} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - 2\gamma_1 P_1\right) d\xi} -$$

$$- \frac{(\theta_f - \theta_b) \exp\left(-\frac{\xi_b^2}{4} - 2\gamma_2 P_b\right)}{\int_{\xi_b}^{\xi_f} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - 2\gamma_2 P_2\right) d\xi} = B\xi_b, \quad (10)$$

$$\theta_b = T_Q/T_0, \quad (11)$$

где

$$A = \phi\mu_s \chi^{(T)} S_h \left( \frac{\rho_h G}{\rho_{s0}} + \frac{\rho_h (1-G)}{\rho_w} - 1 \right), \quad B = \frac{\phi\rho_h L_h S_h}{2\rho c}.$$

Аналогично на основе соотношений (3) с учетом решений (7) и (8) получим систему уравнений для определения координаты поверхности вытеснения нефти сероводородом  $\xi_f$  и значений параметров на нем:

$$k_{s2} \frac{(P_b - P_f) \exp\left(-\frac{\xi_f^2}{4\eta_2}\right)}{\int_{\xi_b}^{\xi_f} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_2}\right) d\xi} = \phi\mu_s \chi^{(T)} (1 - S_{w0}) \xi_f, \quad (12)$$

$$k_l \frac{(P_f - 1) \exp\left(-\frac{\xi_f^2}{4\eta_3}\right)}{\int_{\xi_f}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4\eta_3}\right) d\xi} = \phi\mu_s \chi^{(T)} (1 - S_{w0}) \xi_f, \quad (13)$$

$$\frac{(\theta_f - \theta_b) \exp\left(-\frac{\xi_f^2}{4} - 2\gamma_2 P_f\right)}{\int_{\xi_b}^{\xi_f} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - 2\gamma_2 P_2\right) d\xi} -$$

$$- \frac{(1 - \theta_f) \exp\left(-\frac{\xi_f^2}{4} - 2\gamma_3 P_f\right)}{\int_{\xi_f}^{\infty} \exp\left(-\frac{\xi^2}{4} - 2\gamma_3 P_3\right) d\xi} = 0. \quad (14)$$

Система граничных уравнений (9)–(14) в работе решена следующим образом. Вначале задается нулевое приближение искомого величин на фронте гидратообразования. Далее, решая уравнение (12), находим величину  $P_f$  (как функцию  $\xi_f$ ), подставляя которую в уравнение (13) получим трансцендентное уравнение для нахождения  $\xi_f$ . Решив данное уравнение (методом половинного деления), определим величину  $\xi_f$  (и соответственно  $P_f$ ), а затем из (14) определяем  $\theta_f$ . Далее, подставляя (11) в уравнение (10), получим трансцендентное уравнение для нахождения  $\xi_b$ . Решая данное уравнение (методом половинного деления), определяем новое приближение величины  $\xi_b$ . Затем, решая уравнение (9), находим новое приближение величины  $P_b$ . Циклически повторяя данную итерационную процедуру, получим последовательность значений, сходящуюся к искомым значениям параметров на межфазных границах.

Как было указано выше, в данной работе полагается, что вследствие рассматривания достаточно больших времен после начала инжекции сероводорода кинетикой процесса образования газогидрата  $H_2S$  можно пренебречь. Приведем оценки значений времени, при которых можно пренебречь переходной областью, в которой одновременно присутствуют сероводород, вода и газогидрат  $H_2S$ , и толщина которой зависит от кинетики процесса образования газогидрата сероводорода.

Толщину вышеуказанной переходной области можно оценить следующим образом:

$$\Delta x = \xi_b (\sqrt{\chi^{(T)}(t + \tau)} - \sqrt{\chi^{(T)} t}),$$

где  $\tau$  – характерное значение времени кинетики образования газогидрата  $H_2S$ .

Поскольку протяженность первой зоны равна  $x_b = \xi \sqrt{\tau^{(T)} t}$ , а толщиной переходной области можно пренебречь, если  $\Delta x \ll x_b$ , то имеем следующее условие:

$$\xi_b(\sqrt{\chi^{(T)}(t+\tau)} - \sqrt{\chi^{(T)}t}) \ll \xi_b\sqrt{\chi^{(T)}t}.$$

Откуда имеем:  $t \gg \tau/3$ .

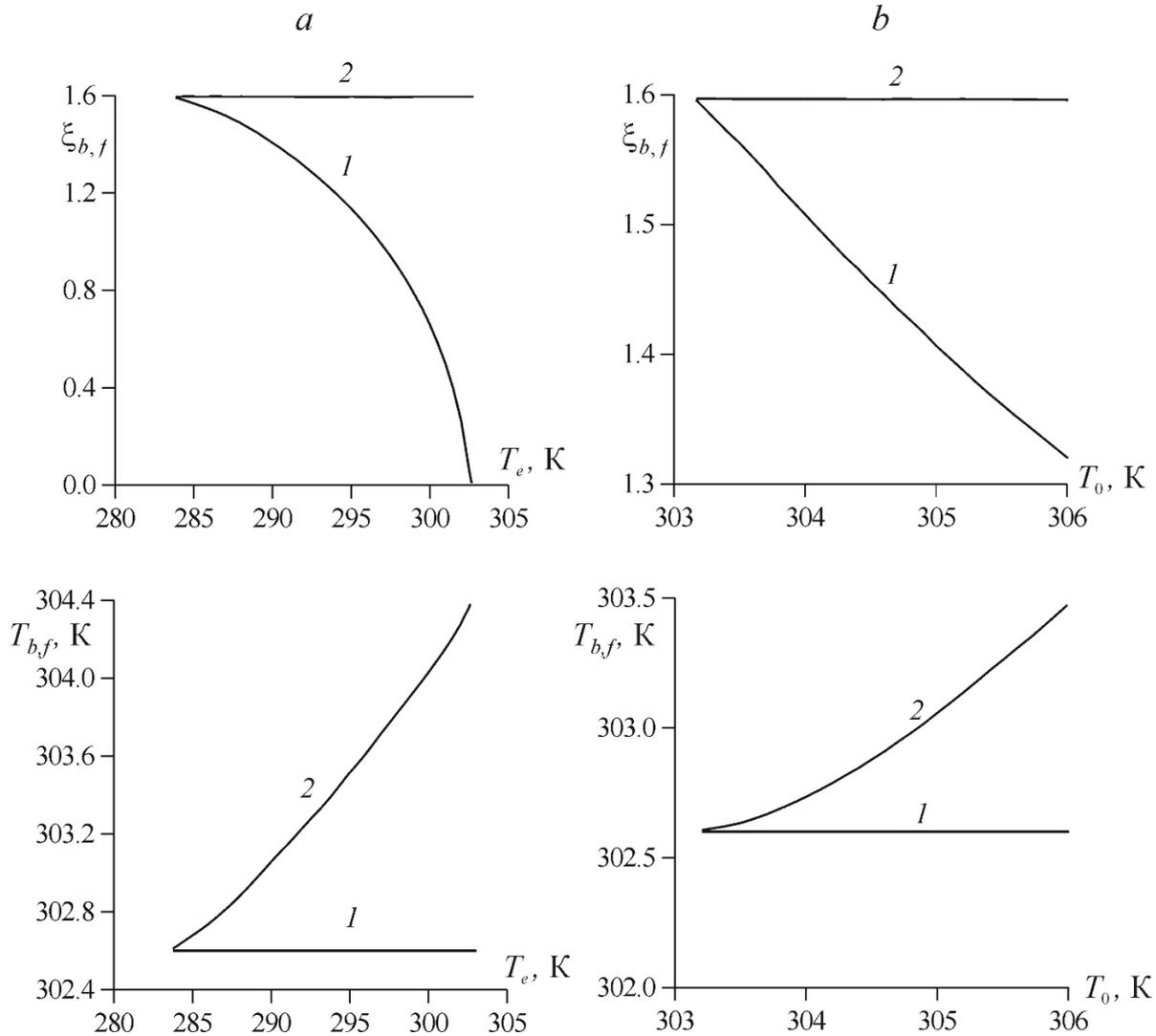
Поскольку экспериментальное значение времени кинетики образования газогидрата  $\tau$  в пористых средах с размерами зерен, характерных для природных пластов, в среднем составляет порядка нескольких часов, то рассматриваемая модель с четким фронтом образования газогидрата  $H_2S$  может применяться при масштабах времени после начала инъекции порядка нескольких суток.

### Результаты расчетов

На рис. 2 приведены зависимости автономной координаты и температуры границ образования газогидрата  $H_2S$  (кривая 1) и вытеснения нефти сероводородом (кривая 2) от температуры закачиваемого сероводорода (а) и начальной температуры пласта (б) и начальной темпера-

туры пласта (б). Здесь и далее, если не оговорено иное для параметров, характеризующих систему, приняты следующие значения:  $\phi=0,1$ ,  $S_{w0}=0,2$ ,  $p_0=8$  МПа,  $p_e=8,4$  МПа,  $T_0=305$  К,  $k_0=10^{-11}$  м<sup>2</sup>,  $G=0,24$ ,  $\lambda=2$  Вт/(м·К),  $\beta_s=3 \cdot 10^{-9}$  Па<sup>-1</sup>,  $\beta_l=1 \cdot 10^{-9}$  Па<sup>-1</sup>,  $\rho c=2 \cdot 10^6$  Дж/(К·кг),  $L_h=4,1 \cdot 10^5$  Дж/кг,  $\mu_s=2 \cdot 10^{-4}$  Па·с,  $\mu_l=2 \cdot 10^{-3}$  Па·с,  $\rho_h=1003$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{os}=890$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{ol}=900$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_w=1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_s=1800$  Дж/(К·кг),  $c_l=1900$  Дж/(К·кг). На рис. 2, а начальная температура пласта  $T_0=305$  К, а на рис. 2, б температура закачиваемого сероводорода  $T_e=290$  К.

Согласно рис. 2, скорость второго фронта практически не зависит от температуры инъекции и начальной температуры пласта, а скорость первого фронта уменьшается с ростом этих параметров. Это обусловлено тем, что скорость фронта вытеснения нефти сероводородом лимитируется интенсивностью массопереноса в пласте, а скорость фронта ги-



**Рис. 2.** Зависимость автономной координаты и температуры границ образования газогидрата  $H_2S$  (кривая 1) и вытеснения нефти сероводородом (кривая 2) от температуры закачиваемого сероводорода (а) и начальной температуры пласта (б)

**Fig. 2.** Dependence of the self-similar coordinate and temperature of the boundaries of  $H_2S$  gas hydrate (curve 1) formation and oil displacement by hydrogen sulfide (curve 2) on the temperature of the injected hydrogen sulfide (а) and the initial temperature of the layer (б)

дратообразования лимитируется, прежде всего, отводом тепла, выделяющегося на первом фронте при гидратообразовании. Поэтому чем выше температура закачиваемого сероводорода и исходная температура пласта, тем ниже интенсивность отвода тепла, выделяющегося на границе гидратообразования.

Также рис. 2 показывает, что температура фронта вытеснения нефти сероводородом повышается с ростом температуры инъекции и начальной температуры пласта, а температура фронта образования гидрата  $H_2S$  остается постоянной. Это обусловлено тем, что положение первого фронта, согласно рис. 2, не зависит от температуры инъекции и начальной температуры пласта, а температура на втором фронте равна температуре квадрупольной точки системы «вода–сероводород».

Также видно, что при достаточно низких значениях температуры инъекции и начальной температуры пласта координаты обоих фронтов выравниваются, т. е. скорость фронта гидратообразования возрастает до скорости фронта вытеснения нефти жидким сероводородом.

Таким образом, существует некоторое значение температуры закачиваемого сероводорода  $T_*$  (назовем его критическим значением), выше которого реализуется рассматриваемый в данной работе режим с двумя различными межфазными границами. На рис. 3 приведены зависимости критического значения температуры инъектируемого сероводорода, соответствующего выравниванию координат обоих фронтов, от начальной температуры пласта при разных давлениях инъекции  $p_e=8,3$  МПа (кривая 1) и 8,4 МПа (кривая 2). Согласно рис. 3, с увеличением начальной температуры пласта и давления инъекции сероводорода критическое значение температуры закачиваемого сероводорода снижается. Иными словами, режим с двумя различными межфазными границами реализуется при достаточно высоких значениях исходной температуры и давления инъекции. Это обусловлено тем, что с увеличением исходной температуры пласта снижается интенсивность отвода тепла, выделяющегося на границе гидратообразования, и соответственно уменьшается скорость фронта гидратообразования. А с увеличением давления инъекции возрастает скорость течения в пористой среде и соответственно увеличивается скорость фронта вытеснения нефти жидким сероводородом. Таким образом, при высоких значениях исходной

температур пласта и давления инъекции сероводорода фронт вытеснения нефти сероводородом опережает фронт образования газогидрата  $H_2S$  даже при низких значениях температуры закачиваемого сероводорода.

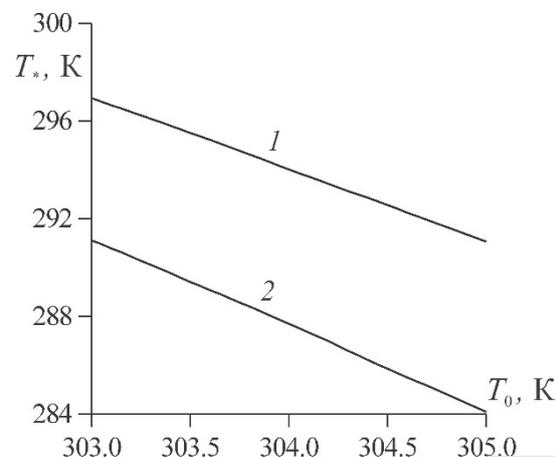


Рис. 3. Зависимость критического значения температуры инъекции от начальной температуры пласта при  $p_e=8,3$  МПа (кривая 1) и 8,4 МПа (кривая 2)

Fig. 3. Dependence of the critical injection temperature on the initial layer temperature at  $p_e=8,3$  MPa (curve 1) and 8,4 MPa (curve 2)

#### Заключение

В результате математического моделирования инъекции жидкого сероводорода в пласт, насыщенный нефтью и водой, установлено, что с повышением начальной температуры пласта и температуры инъекции координата фронта образования газогидрата  $H_2S$  уменьшается, а температура фронта вытеснения нефти сероводородом увеличивается. Показано, что при низких значениях температуры инъекции и исходной температуры пористой среды режим с двумя межфазными поверхностями переходит в режим с одной межфазной поверхностью. Установлено, что критическое значение температуры закачиваемого сероводорода, выше которого реализуется режим с двумя различными межфазными границами, уменьшается с увеличением начальной температуры пласта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Республики Башкортостан (проект № 17-48-020123\_p\_a).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Machel H.G. Geological and hydrogeological evaluation of the Nisku Q-Pool in Alberta, Canada, for  $H_2S$  and/or  $CO_2$  storage // Oil Gas Sci. Technol. – 2005. – V. 60. – P. 51–65.
2. Numerical modeling of injection and mineral trapping of  $CO_2$  with  $H_2S$  and  $SO_2$  in a sandstone formation / T. Xu, J.A. Apps, K. Pruess, H. Yamamoto // Chemical Geology. 2007. – V. 24. – № 3–4. – P. 319–346.
3. Factors affecting the chromatographic partitioning of  $CO_2$  and  $H_2S$  injected into a water-saturated porous medium / S. Bachu,

D.B. Bennion, M. Pooladi-Darvish, H. Hong // Energy Procedia. – 2009. – V. 1. – P. 3165–3172.

4. Bachu S., Pooladi-Darvish M., Hong H. Chromatographic partitioning of impurities ( $H_2S$ ) contained in a  $CO_2$  stream injected into a deep saline aquifer: P. 2. Effects of flow conditions // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2009. – V. 3. – № 4. – P. 468–473.
5. Оценка возможности захоронения углекислого газа в криолитозоне Западной Сибири / А.Д. Дучков, Л.С. Соколова, Д.Е. Аюнов, М.Е. Пермяков // Криосфера Земли. – 2009. – Т. 13. – № 4. – С. 62–68.

6. Чувиллин Е.М., Гурьева О.М. Экспериментальное изучение образования гидратов  $\text{CO}_2$  в поровом пространстве промерзающих и мерзлых пород // Криосфера Земли. – 2009. – Т. 13. – № 3. – С. 70–79.
7. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. – М.: Химия, 1980. – 296 с.
8. Sloan E.D., Koh C.A. Clathrate Hydrates of Natural Gases. – Boca Raton: CRC Press, 2007. – 752 p.
9. Influence of Pore Size, Salinity and Gas Composition upon the Hydrate Formation Conditions / M. Yang, Y. Song, Y. Liu, Y. Chen, Q. Li // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2010. – V. 18. – № 2. – P. 292–296.
10. Zhang P., Wu Q., Yang Y. Characteristics of Methane Hydrate Formation in Artificial and Natural Media // Energies. – 2013. – V. 6. – № 3. – P. 1233–1249.
11. Livio R. Exploring methane-hydrate formation and dissociation in geologic materials through laboratory experiments: Kinetic behavior and morphology // Fuel. – 2015. – V. 141. – P. 173–184.
12. Preservation phenomena of methane hydrate in pore spaces / A. Nachikubo, S. Takeya, E. Chuvilin, V. Istomin // Physical Chemistry Chemical Physics. – 2011. – V. 13. – P. 17449–17452.
13. Чувиллин Е.М., Гребенкин С.И. Экспериментальная оценка газопроницаемости газонасыщенных пород при гидратообразовании и замораживании // Криосфера земли. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 64–74.
14. Цыпкин Г.Г. Течения с фазовыми переходами в пористых средах. – М.: Физматлит, 2009. – 232 с.
15. 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.
16. 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.
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. Цыпкин Г.Г. Образование гидрата углекислого газа при его инъекции в истощенное месторождение углеводородов // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 2014. – № 6. – С. 101–108.
19. Шагапов В.Ш., Чиглинцева А.С., Белова С.В. К теории процесса образования газогидрата в замкнутом теплоизолированном объеме, опрессованном метаном // Инженерно-физический журнал. – 2017. – Т. 90. – № 5. – С. 1208–1222.
20. Хасанов М.К. Инъекция жидкого сероводорода в пласт, насыщенный нефтью и водой // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2017. – Т. 3. – № 2. – С. 72–84.

Поступила 13.03.2018 г.

#### Информация об авторах

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

UDC 622.279.72

## MATHEMATICAL MODEL OF HYDROGEN SULFIDE INJECTION INTO A RESERVOIR PARTIALLY SATURATED WITH WATER

Marat K. Khasanov,  
hasanovmk@mail.ru

Sterlitamak Branch of Bashkir State University,  
37, Lenin Avenue, Sterlitamak, 453103, Russia.

**The relevance** of the research is related to the development of theoretical foundations of underground disposal technologies for hydrogen sulfide produced by industrial facilities for reducing its emission into the atmosphere. The paper considers the method of hydrogen sulfide utilization in the gas hydrate state, in which the same amount of gas can be stored at significantly lower pressures.

**The aim** of the research is to study the features of formation of  $H_2S$  gas hydrate when injecting liquid hydrogen sulfide into a porous reservoir.

**Object** of the research is a porous formation saturated with oil and water, the initial pressure of which is lower than the equilibrium pressure of formation of hydrogen sulfide gas hydrate.

**Methods.** Based on the equations of continuum mechanics the authors have developed the mathematical model of heat and mass transfer in a natural reservoir, accompanied by formation of hydrogen sulfide gas hydrate. It is assumed that in the case under consideration, three characteristic zones and, respectively, two moving interphase front arise in the reservoir: between the first and the second zones where the water completely passes to the gas hydrate state (the hydrate formation front) and between the second and the third zones where oil is displaced by hydrogen sulfide (displacement front). Using the method of reduction to the self-similar variable the authors constructed the analytical solutions for the dimensionless pressure and temperature values in each of the three regions of the reservoir and studied the dependence of the coordinate and temperature of the interface boundaries on the temperature of the injected hydrogen sulfide and the initial temperature of the formation.

**Results.** It was established that the coordinate of the formation front of  $H_2S$  gas hydrate decreases, and the temperature of the front of oil displacement by hydrogen sulfide increases when the initial temperature of the formation and temperature of injected liquid hydrogen sulfide grow. It is shown that at sufficiently low values of reservoir temperature and injected hydrogen sulfide, the coordinates of hydrate formation and displacement fronts can be aligned. The authors constructed the solution maps in the parameter plane «injection temperature – the initial temperature of the reservoir», i. e. critical diagrams that determine the existence of a mode in which the front of oil displacement by hydrogen sulfide is ahead of formation front of  $H_2S$  gas hydrate.

### Key words

Mathematical model, self-similar solution, porous medium, filtration, gas hydrates, hydrogen sulfide.

This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Republic of Bashkortostan (project no. 17-48-020123).

### REFERENCES

- Machel H.G. Geological and hydrogeological evaluation of the Nisku Q-Pool in Alberta, Canada, for  $H_2S$  and/or  $CO_2$  storage. *Oil Gas Sci. Technol.*, 2005, vol. 60, pp. 51–65.
- Xu T., Apps J. A., Pruess K., Yamamoto H. Numerical modeling of injection and mineral trapping of  $CO_2$  with  $H_2S$  and  $SO_2$  in a sandstone formation. *Chemical Geology*, 2007, vol. 24, no. 3–4, pp. 319–346.
- Bachu S., Bennion D.B., Pooladi-Darvish M., Hong H. Factors affecting the chromatographic partitioning of  $CO_2$  and  $H_2S$  injected into a water-saturated porous medium. *Energy Procedia*, 2009, vol. 1, pp. 3165–3172.
- Bachu S., Pooladi-Darvish M., Hong H. Chromatographic partitioning of impurities ( $H_2S$ ) contained in a  $CO_2$  stream injected into a deep saline aquifer: P. 2. Effects of flow conditions. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2009, vol. 3, no. 4, pp. 468–473.
- Duchkov A.D., Sokolova L.S., Ayunov D.E., Permyakov M.E. Assessment of potential of west Siberian permafrost for the carbon dioxide storage. *Earth's Cryosphere*, 2009, vol. 13, no. 4, pp. 62–68.
- Chuvilin E.M., Guryeva O.M. Experimental investigation of  $CO_2$  gas hydrate formation in porous media of frozen and freezing sediments. *Earth's Cryosphere*, 2009, vol. 13, no. 3, pp. 70–79.
- Byk S.Sh., Makogon Yu.F., Fomina V.I. *Gazovye gidraty* [Gas hydrates]. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 296 p.
- Sloan E.D., Koh C.A. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. Boca Raton, CRC Press, 2007. 752 p.
- Yang M., Song Y., Liu Y., Chen Y., Li Q. Influence of Pore Size, Salinity and Gas Composition upon the Hydrate Formation Conditions. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2010, vol. 18, no. 2, pp. 292–296.
- Zhang P., Wu Q., Yang Y. Characteristics of Methane Hydrate Formation in Artificial and Natural Media. *Energies*, 2013, vol. 6, no. 3, pp. 1233–1249.
- Livio R. Exploring methane-hydrate formation and dissociation in geologic materials through laboratory experiments: Kinetic behavior and morphology. *Fuel*, 2015, vol. 141, pp. 173–184.
- Hachikubo A., Takeya S., Chuvilin E., Istomin V. Preservation phenomena of methane hydrate in pore spaces. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2011, vol. 13, pp. 17449–17452.
- Chuvilin E.M., Grebenkin S.I. Gas permeability variations in gas-filled soils upon hydrate formation and freezing: An experimental study. *Earth's Cryosphere*, 2005, vol. 19, no. 2, pp. 59–64.
- Tsyppin G.G. *Techeniya s fazovymi perekhodami v poristykh sredakh* [Flows with phase transitions in porous media]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 232 p.
- Shagapov V.Sh., 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.
- Gimaltdinov I.K., Khasanov M.K. Mathematical model of the formation of a gas hydrate on the injection of gas into a stratum par-

- tially saturated with ice. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, vol. 80, no. 1, pp. 57–64. 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. Tsyarkin G.G. Formation of carbon dioxide hydrate at the injection of carbon dioxide into a depleted hydrocarbon field. *Fluid Dynamics*, 2014, vol. 49, no. 6, pp. 789–795. In Rus.
  19. Shagapov V.Sh., Chiglintseva A.S., Belova S.V. On the Theory of Formation of a Gas Hydrate in a Heat-Insulated Space Compacted with Methane. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 5, pp. 1147–1161. In Rus.
  20. Khasanov M.K. Injection of liquid hydrogen sulfide in a layer saturated with oil and water. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2017, vol. 3, no. 2, pp. 72–84. In Rus.

*Received: 13 March 2018.*

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

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

УДК 550.812:553.073

## МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗА И ПОИСКОВ КРУПНООБЪЕМНЫХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА

Мансуров Ринат Халитович,  
rinman81@bk.ru

Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов,  
Россия, 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, 129, к. 1.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью изучения и вовлечения в производство новых крупнообъемных золоторудных месторождений, что будет способствовать образованию и долгосрочному развитию целых регионов РФ. Важным аспектом является разработка новых и совершенствование существующих методов поисков золоторудных месторождений.

**Целью** исследования является апробация методики поисков золоторудных месторождений в сложных горно-таежных ландшафтах применительно к условиям Енисейского кряжа, в частности, в пределах малоизученной восточной части этого региона, а также выделение прогнозно-поисковых критериев и признаков вновь выявленного рудопроявления Буреминское и их сопоставление с критериями и признаками известного крупнообъемного золото-сульфидного Олимпиадинского месторождения.

**Методы исследования:** анализ литературных и фондовых данных; прогнозные построения на предмет выделения перспективных поисковых участков на выявление крупнообъемного золотого оруденения; разработка новых и совершенствование существующих методов и методических приемов поисков золоторудных месторождений; применение этих методов (литохимическое опробование по вторичным ореолам рассеяния разных уровней разреза элювиально-делювиальных отложений, шлиховое и сколковое (точечное) опробование) на практике; лабораторно-аналитические исследования – полуколичественный спектральный анализ на 26 элементов, химико-спектральный анализ на золото.

**Результаты.** Вновь выявлена рудоконтролирующая зона складчато-разрывных деформаций рудопроявления Буреминское, приуроченная к зоне разрывных нарушений северо-северо-западной ориентировки, опережающих к Ишимбинской системе разломов, в узле их сочленения с разрывами СВ направления. Комплекс шлихового и литохимического по вторичным ореолам рассеяния опробования надкоренного информативного малосмещенного горизонта элювиально-делювиальных отложений позволил выявить в пределах зоны расланцевания несколько золотоносных минерализованных зон. Последние представляют собой зоны-залежи рассеянной вкрапленной золото-сульфидной минерализации, локализованные в интенсивно железо-магнезиально-карбонатизированных углеродсодержащих карбонат-кварц-серицитовых сланцах удерейской свиты сухопитской серии среднего рифея. Для золотой минерализации рудопроявления Буреминское выделены прогнозно-поисковые критерии и признаки. По ряду из них наиболее близким аналогом рудопроявления являются первичные вкрапленные золото-сульфидные руды Олимпиадинского месторождения, с которым проведено сопоставление основных геологических элементов рудопроявления Буреминское.

### Ключевые слова:

Методы поисков золоторудных месторождений, Енисейский кряж, крупнообъемное вкрапленное золото-сульфидное оруденение, рудопроявление Буреминское, Олимпиадинское месторождение, прогнозно-поисковые критерии и признаки.

### Введение

В настоящее время на территории РФ известно множество золоторудных месторождений и проявлений, основная часть которых локализуется в углеродисто-карбонатно-терригенных комплексах складчатых поясов в обрамлении Сибирской платформы [1–4]. Следует констатировать, что большинство золоторудных объектов выявлено еще в советский период. Этот факт обусловлен главным образом тем, что известные месторождения и проявления коренного золота, как правило, приурочены к крупным рудно-россыпным районам и узлам с развитой инфраструктурой, исследуемым еще с XIX в. Примером этого могут служить Северо-Енисейский на Енисейском кряже (месторождения Советское, Эльдорадо, Олимпиадинское, Благодатное и др.) и Бодайбинский в Байкало-Патомской провинции (месторождения Сухой Лог, Вернинское, Высочайшее, Чертово Коряго и др.) рудные районы [5, 6]. Сегодня особый интерес вызывают вопросы прогноза и поисков крупнообъемных месторождений золота, на базе которых могут осваиваться и долгосрочно развиваться целые регионы [7].

### Объект исследования

Под руководством автора настоящей работы был проведен комплекс прогнозно-поисковых работ на перспективном участке Буреминский, расположенном на севере Мотыгинского района Красноярского края в 40 км севернее пгт. Южно-Енисейский. Предшествующими работами в пределах этого участка была проведена геологическая съемка масштаба 1:200000, а также поисково-разведочные работы на россыпи золота. В пределах перспективного участка известно несколько мелких и средних по продуктивности россыпей золота, среди которых основными являются россыпи долин рр. Бол. Бурема и Бол. Орнакул. Сведения о коренной золотоносности района работ отсутствуют. Лишь по данным В.С. Станкевича и др. при оценке россыпной золотоносности вышеупомянутых водотоков установлено несколько пунктов золотой минерализации, связанной с рассеянной вкрапленностью сульфидов (1988ф).

На этапе прогноза, помимо наличия промышленной россыпной золотоносности участка работ, учитывались такие факторы, как структурно-тек-

тоническая позиция объекта исследований, благоприятный литолого-стратиграфический уровень, степень метаморфизма, потенциально рудоносные гидротермально-метасоматические преобразования, данные геофизических исследований и др.

В металлогеническом плане участок расположен в заангарской части Енисейского кряжа, на северо-восточном фланге Южно-Енисейского рудного района, и входит в состав Тужимского рудного узла (рис. 1). Авторская оценка прогнозных ресурсов категории  $P_3$  рудного узла составляет 50 т коренного золота (А.А. Стороженко и др., 2004ф).

Структурно-тектоническая позиция определяется положением в зоне сочленения двух крупных структур Енисейского кряжа – Центрального антиклинория и Ангаро-Питского синклинория, восточнее зоны Ишимбинской системы рудоконтролирующих разломов. Непосредственно участок работ приурочен к восточной приядерной части Ишимбинской антиклинали. В пределах участка

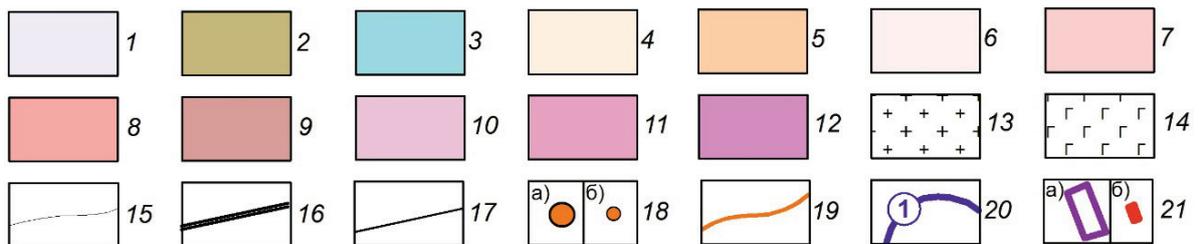
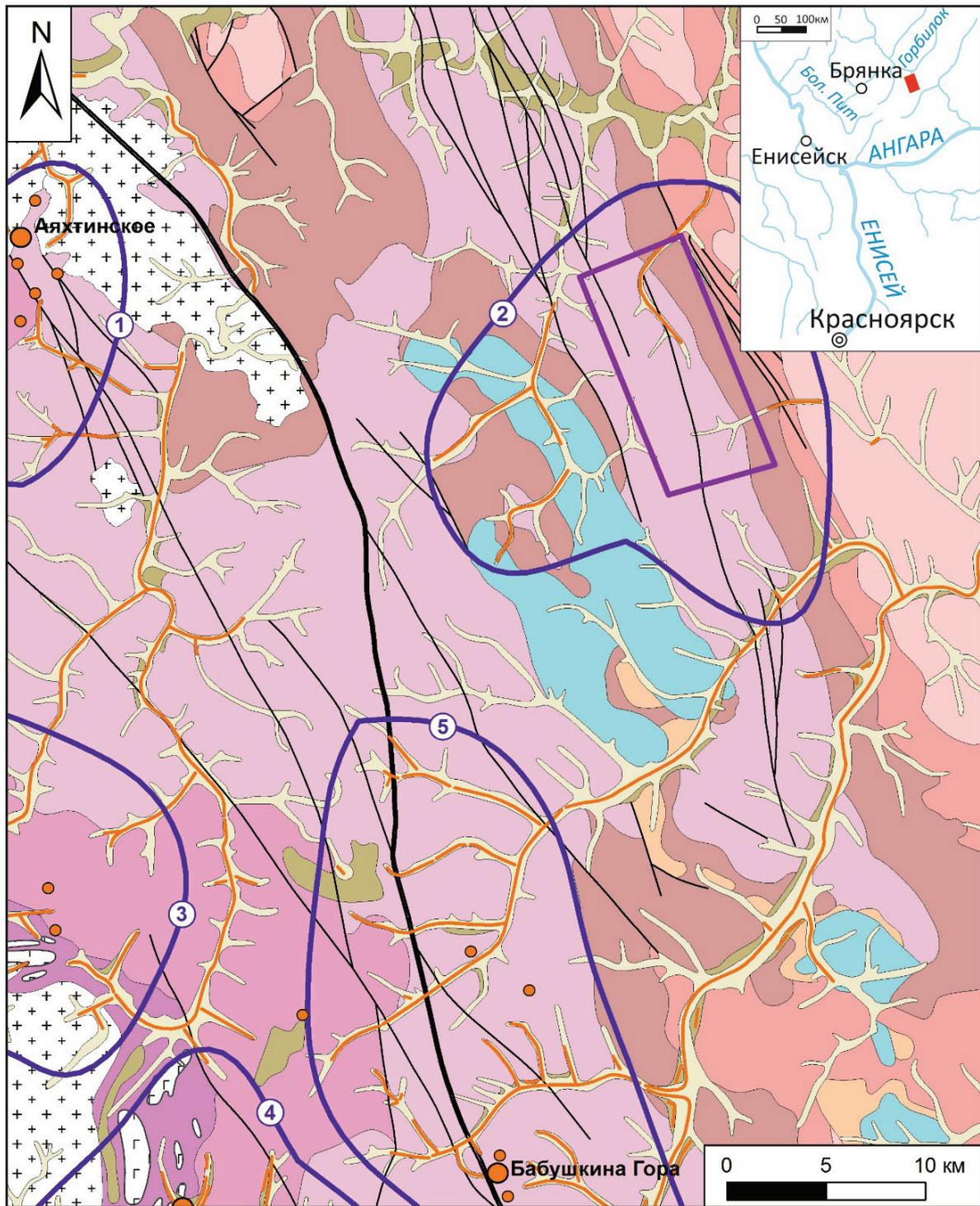
устанавливается крупный разлом ССЗ ориентировки, вероятно, являющийся оперяющим к Ишимбинской зоне разломов.

В геологическом строении района принимают участие дислоцированные и в различной степени метаморфизованные углеродсодержащие карбонатно-терригенные породы верхнего (шунтарская ( $R_1sn$ ), потоскуйская ( $R_3pt$ ) свиты) и среднего (аладинская ( $R_2al$ ), карточки ( $R_2kr$ ), удерейская ( $R_2ud$ ), горбилоская ( $R_2gr$ ) свиты) рифея. Площадь работ амагматична – ближайший интрузивный массив выходит на поверхность в 16 км западнее участка.

Участок Буреминский приурочен к зоне развития хлорит-серицитовой субфации зеленосланцевой фации регионального метаморфизма, выраженной в развитии зон рассланцевания с проявлением хлоритизации, мусковитизации, серицитизации и вновь образованных пирита, сидерита и других низкотемпературных минералов. Хлорит-

**Рис. 1.** Обзорная схема северо-восточной части Южно-Енисейского рудного района (с использованием данных ОАО «Красноярскгеолсъемка»): 1 – четвертичные отложения; 2–12 – стратифицированные образования: 2 – неоген-палеогеновые отложения: галечники, пески, глины (кирнаевская ( $N_1kr$ ), бельская ( $P-N_1bl$ ), мурожнинская ( $P_2mr$ ) свиты); 3 – кембрий-вендские карбонатные отложения: доломиты, известняки, мергели (эвенкийская серия ( $E_2-ev$ ), лебяжинская ( $V-E_1lb$ ), иркинеевская ( $E_1ir$ ), островная ( $V-E_1os$ ) свиты); 4, 5 – вендские карбонатно-терригенные отложения: 4 – чапская серия: песчаники, алевролиты, доломиты (немчанская ( $Vnm$ ), подьемская ( $Vpd$ ), суворовская ( $Vsv$ ) свиты); 5 – тасеевская серия: песчаники с прослоями алевролитов, аргиллитов (мошаковская ( $Vms$ ), чистяковская ( $Vcv$ ), аleshинская ( $Val$ ) свиты); 6–9 – верхнерифейские углеродистые карбонатно-терригенные отложения: 6 – чингасанская серия: песчаники, алевро-песчаники, алевролиты, известняки (чивидинская ( $R_3cv$ ), карьерная ( $R_3krr$ ), лопатинская ( $R_3lp$ ) свиты); 7 – ослянская серия: известняки глинистые, алевро-сланцы, песчаники (дашкинская ( $R_3ds$ ), нижнеангарская ( $R_3na$ ) свиты); 8 – киргитейская серия: сланцы известковисто-глинистые (мокринская ( $R_3mk$ ), рыбинская ( $R_3rb$ ), бореминская ( $R_3br$ ), удоронская ( $R_3ud$ ) свиты); 9 – тунгусикская серия: филлиты, сланцы углеродистые, метаалевролиты (шунтарская ( $R_3sn$ ), потоскуйская ( $R_3pt$ ) свиты); 10 – среднерифейские углеродсодержащие вулканогенно-карбонатно-терригенные отложения: сухопитская серия: темно-серые, черные, серо-зеленые сланцы, филлиты, метапесчаники, метаизвестняки (аладинская ( $R_2al$ ), карточки ( $R_2kr$ ), удерейская ( $R_2ud$ ), горбилоская ( $R_2gr$ ) свиты); 11 – нижнерифейские углеродсодержащие карбонатно-терригенные отложения: филлиты, сланцы, кварцитовидные песчаники, известняки (кординская ( $R_1kd$ ) свита); 12 – нижнепротерозойские карбонатно-терригенные отложения: тейская серия: кристаллические сланцы, кварциты, мрамора (пенченгинская свита ( $PR_2pn$ )); 13, 14 – интрузивные образования: 13 – плагиогранодиориты (татарско-аяхтинский ( $R_3ta$ ) комплекс); 14 – ортоамфиболиты, метагаббро (индыглинский ( $R_i$ ) комплекс); 15 – геологические границы; 16, 17 – разрывные нарушения: 16 – ось зоны Ишимбинского глубинного разлома, 17 – остальные разрывные нарушения; 18 – месторождения (а) и проявления (б) коренного золота; 19 – россыпи золота; 20 – контуры золоторудно-россыпных узлов: 1) Аяхтинский, 2) Тужимский, 3) Верхне-Пенченгинский, 4) Партизанский, 5) Ишимбинско-Петропавловский; 21 – контур рудопроявления Буреминское: а) на схеме, б) на врезке

**Fig. 1.** Overview scheme of northern-eastern parts of the Yenisei ridge (compiled using the data of «Krasnoyarskgeolsemka»): 1 are the quaternary sediments; 2–12 are the stratified formations: 2 are the Neogene-Paleogene deposits: pebble, sands, clay (kirnaevskaya ( $N_1kr$ ), belskaya ( $P-N_1bl$ ), murozhninskaya ( $P_2mr$ ) series); 3 are the Cambrian-Vendian carbonate sediments: dolomites, limestones, marls (evenkiyskaya series ( $E_2-ev$ ), lebyazhinskaya ( $V-E_1lb$ ), irkineevskaya ( $E_1ir$ ), ostrovnaya ( $V-E_1os$ ) series); 4, 5 are the Vendian carbonate-terrigenous sediments: 4 is the chapskaya series: sandstones, siltstones, dolomites (nemchanskaya ( $Vnm$ ), podemskaya ( $Vpd$ ), suvorovskaya ( $Vsv$ ) series); 5 is the taseevskaya formation: sandstones with interlayers of siltstones, mudstones (moshakovskaya ( $Vms$ ), chistyakovskaya ( $Vcv$ ), aleshinskaya ( $Val$ ) series); 6–9 are the Upper Riphean carbonaceous carbonate-terrigenous sediments: 6 is the chingasanskaya formation: sandstones, silt-sandstones, siltstones, limestones (chividinskaya ( $R_3cv$ ), karernaya ( $R_3krr$ ), lopatinskaya ( $R_3lp$ ) series); 7 is the oslyanskaya formation: shale silt, sandstone (dashkinskaya ( $R_3ds$ ), nizhneangarskaya ( $R_3na$ ) series); 8 is the kirgiteyskaya formation: clay-limestone schists (mokrinskaya ( $R_3mk$ ), rybinskaya ( $R_3rb$ ), boreminskaya ( $R_3br$ ), udoronskaya ( $R_3ud$ ) series); 9 is the tungusikskaya formation: phyllites, carbonaceous schists, metalevolites (shuntarskaya ( $R_3sn$ ), potoskuyskaya ( $R_3pt$ ) series); 10 are the Middle Riphean carbonaceous volcanogenic-carbonate-terrigenous sediments: sukhopitskaya formation: dark gray, black, gray-green schists, phyllites, metasandstones, metalimestones (aladinskaya ( $R_2al$ ), kartochki ( $R_2kr$ ), udereyskaya ( $R_2ud$ ), gorbilokskaya ( $R_2gr$ ) series); 11 are the Lower-Riphean carbonaceous carbonate-terrigenous sediments: phyllites, schists, quartzite sandstones, limestones (kordinskaya ( $R_1kd$ ) series); 12 are the Lower Proterozoic carbonate-terrigenous sediments: teyskaya series: crystalline schists, quartzites, marbles (penchenginskaya series ( $PR_2pn$ )); 13, 14 are the intrusive formations: 13 are the plagiogranodiorites (tatarsko-ayakhtinski ( $R_3ta$ ) complex); 14 are the orthoamphibolites, metagabbros (indyglinski ( $R_i$ ) complex); 15 are the geological boundaries; 16, 17 are the faults: 16 is the axis of the Ishimbinsky deep fault; 17 are the other faults; 18 are the gold ore deposits (a) and the ore occurrences (b); 19 are the gold placers; 20 are the contours of gold ore and placer areas: 1) Ayakhtinsky, 2) Tuzhinsky, 3) Verkhne-Penchenginsky, 4) Partizansky, 5) Ishimbinsko-Petropavlovsky; 21 is the contour of the Bureminskoe ore occurrence: a) on the scheme, b) on the inset map



серицитовая субфация является благоприятной для промышленного золотого оруденения крупнообъемного прожилково-вкрапленного типа [8–12]. Крупнообъемное золото-сульфидное оруденение развивается в основном в нижней подзоне хлорит-серицитовой зоны и частично в биотит-хлоритовой, а золотоносные жилы – в верхней подзоне хлорит-серицитовой зоны. По мере усиления степени регионального метаморфизма вмещающих толщ изменяется и общий минеральный состав сульфидов: пиритовая минерализация, резко преобладающая в хлорит-серицитовой зоне, постепенно сменяется пирит-пирротиновой минерализацией в биотит-хлоритовой зоне метаморфизма, затем пирротиновой в более высокотемпературных фациях метаморфизма [8, 9, 13]. В нижней части хлорит-серицитовой зоны в повышенном количестве отмечается арсенопирит. Некоторые из этих благоприятных для оруденения признаков наблюдаются в пределах поискового участка, в частности комплексный состав сульфидной минерализации (пирит, пирротин, арсенопирит).

В пределах участка Буреминский развиты интенсивные гидротермально-метасоматические преобразования пород, выраженные в прожилково-вкрапленной железо-магнезиальной карбонатизации, (прожилково)-вкрапленной сульфидизации, жильно-прожилковой кварцевой минерализации, мусковитизации (серицитизации).

По данным ООО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика» по структурным особенностям магнитного поля выделяются участки интенсивных гидротермально-метасоматических изменений, отвечающие областям резкого ослабления интенсивности линейных магнитных аномалий и полного градиента магнитного поля – участки разрушения («распада») структуры магнитного поля (рис. 2) [14]. Наиболее вероятно, участки «распада» структуры магнитного поля связаны с разрушением в результате гидротермально-метасоматического преобразования осадочно-метаморфогенного магнетита (горбилокская свита) и пирротина (удерейская свита и др.).

#### Методика исследования

Поисковые работы на рудное золото в регионе затруднены значительной закрытостью склонов и водоразделов, развитием многолетнемерзлых моховых и гумусово-торфяных слоев значительной мощности. В таких условиях традиционные методы поисков оказываются недостаточно эффективными, поскольку информативный для оценки золотоносности надкоренной малосмещенный элювиально-делювиальный слой перекрыт дальнеприносными отложениями. Стандартное литохимическое опробование по вторичным ореолам рассеяния (ВОР) подпочвенного горизонта зачастую не позволяет выявлять аномалии золота и сопутствующих элементов.

В связи с отмеченным фактом при проведении поисковых работ на перспективном участке применялась «Экспрессная методика поисков золото-

рудных месторождений в сложных горно-таежных ландшафтах», успешно использованная ФГУП ЦНИГРИ на золоторудных объектах Байкало-Патомской и Верхояно-Жолымской золоторудных провинций, Лебединского золоторудного узла (Саха-Якутия) и др. [15, 16]. Данная методика позволяет в достаточно короткие сроки с использованием минимального объема горно-буровых работ оценить золотоносность и ресурсный потенциал поисковых участков в ранге рудных полей. Методика основана на комплексировании известных методов и способов изучения делювиально-элювиальных отложений в целях поисков месторождений рудных полезных ископаемых: обломочном (оконтуривание делювиальных свалов рудных тел), копушения, минералогическом (+ минералого-геохимическом), литохимическом [15].

Поисковые работы осуществлялись в несколько последовательных этапов [17].

1. *Шлиховое опробование* аллювиальных отложений в пределах участка Буреминский позволило подтвердить золотоносность рр. Бол. Бурема, Бол. Орнакул, а также установить золотоносность правых притоков р. Бол. Бурема (руч. Успенский и др.), правых и левых притоков р. Бол. Орнакул (руч. Золотой и др.). Золото в россыпях достаточно мелкое (0,1–0,6 мм), слабо окатанное, редко в сростках с кварцем. Наличие мелкого и тонкого золота в россыпях служит косвенным признаком наличия крупнообъемного золото-сульфидного оруденения на участке [18].
2. *Геолого-поисковые маршруты* с литохимическим опробованием (глубина 0,6 м) по опорным профилям по сети 1000×50 м позволили выявить две рудоконтролирующие зоны складчато-разрывных деформаций (рассланцевания) на водоразделе рр. Бол. Бурема, Б. Орнакул и Тужимо (рис. 3), представленные брекчированными, окварцованными, серицитизированными и сульфидизированными породами. В пределах зон рассланцевания весьма интенсивно проявлена прожилково-вкрапленная железо-магнезиальная карбонатизация, наличие которой может являться благоприятным признаком золотоносного процесса [8, 16]. Главная зона имеет мощность от 300 м в северной части до 1500 м в южной; протяженность зоны прослежена на расстояние более 10 км. По данным литохимического опробования зоны рассланцевания выделяются в аномальных геохимических полях (АГХП) по содержаниям более 0,005 г/т золота. Следует подчеркнуть, что для поисков крупнообъемного месторождения выбранная сеть опробования является оптимальной, поскольку крупнообъемное золотое оруденение, как правило, образует протяженные (более 1 км) и широкие (первые сотни и более метров) слабоконтрастные аномальные поля золота во вторичных ореолах рассеяния.

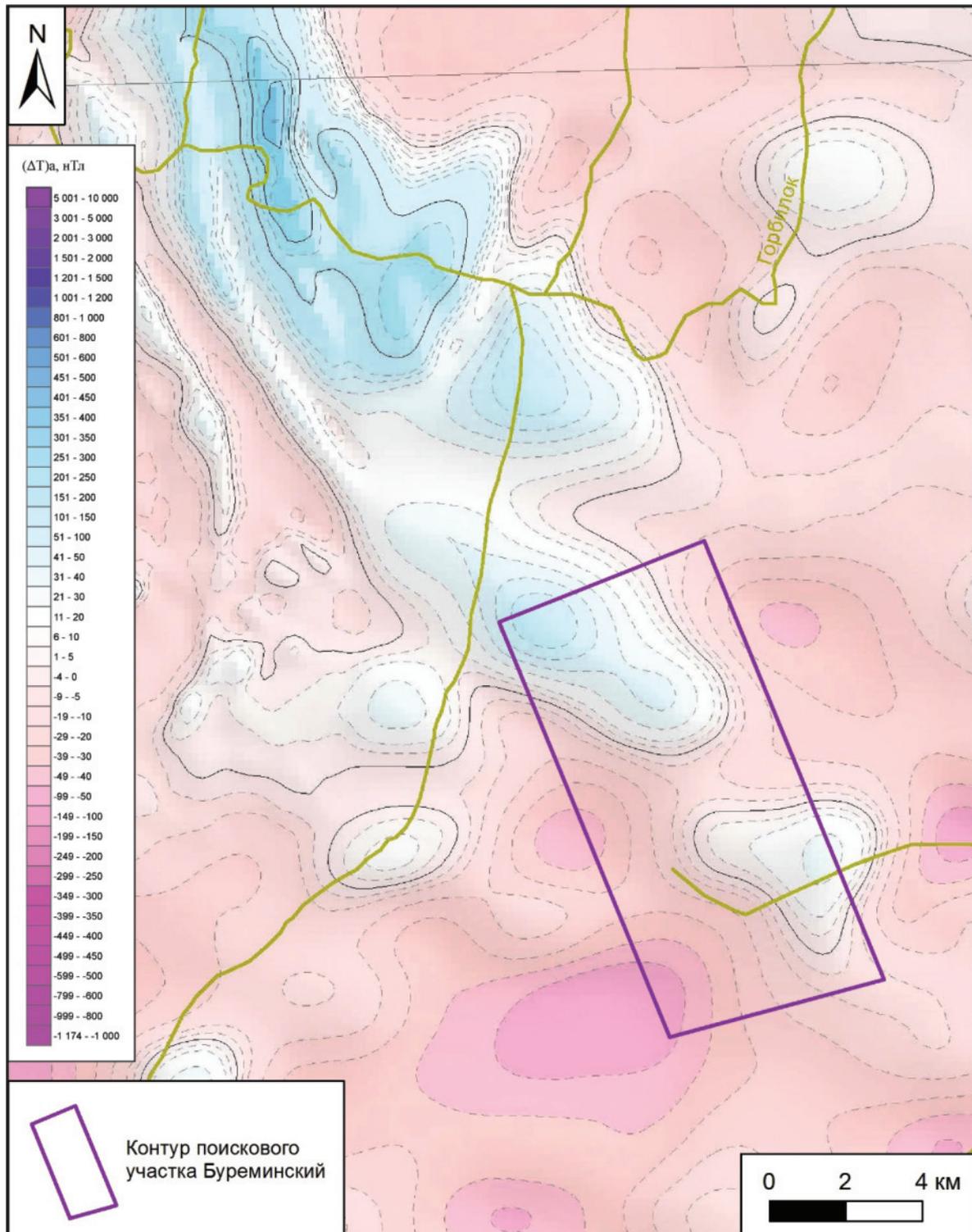


Рис. 2. Карта аномального магнитного поля (с использованием данных ООО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика»)

Fig. 2. Magnetic anomalous field map (compiled using the data of «NPP VIRG-Rudgeophizika»)



3. С целью локализации потенциально золотоносных минерализованных зон, с учетом данных литохимического опробования по ВОР, участки повышенной (до 5–7 %) сульфидной вкрапленности, сопровождаемые обильной (до 60–70 %) железо-магнезиальной карбонатизацией, были пересечены линиями копушей глубиной 1,0–1,2 м с интервалом 40 м между выработками. Методикой работ предусматривалось комплексное опробование этих выработок: 1) литохимическое опробование по ВОР на глубине 0,6 м; 2) шлиховое и литохимическое опробование по ВОР малосмещенного информативного горизонта в забое копушей на глубине 1,0–1,2 м. Литохимическое опробование по ВОР на разных уровнях элювиально-делювиальных отложений позволяет соотнести полученные данные с целью определения оптимального информативного комплекса методов поисков. Кроме того, производилось сколковое (точечное) опробование гидротермально-измененных минерализованных пород.

В результате работ третьего этапа было локализовано несколько потенциально золотоносных минерализованных зон в разных частях участка, наиболее мощная (более 600 м) и протяженная (более 2 км) среди которых расположена в южной части участка.

### Результаты исследования

Главная зона рассланцевания, наиболее вероятно, являющаяся источником промышленных россыпей золота в пределах участка Буреминский, контролируется системой разрывных нарушений ССЗ ориентировки, являющейся оперяющей (с востока) к зоне системы Ишимбинского регионального долгоживущего рудоконтролирующего разлома. Зона рассланцевания приурочена к восточному крылу крупной антиклинали, к ее приаудерной части. Падение вмещающих пород в этом участке варьирует от 45 до 85° на восток. По-видимому, важнейшими структурными элементами золотой минерализации являются поперечные СВ разрывные нарушения, к узлам сочленения которых с ССЗ разломом и приурочена золотая минерализация (рис. 3).

Зона рассланцевания локализуется в углеродисто-терригенной толще удерейской свиты среднего рифея ( $R_{2ud}$ ). Восточная граница зоны приурочена к контакту верхнеудерейской подсвиты (углеродсодержащие алевроито-глинистые сланцы) с вышележащими карбонатно-терригенными отложениями погорюйской свиты ( $R_{2pg}$ ). Основными вмещающими породами являются отложения среднеудерейской подсвиты – карбонат-кварц-серицитовые (известково)-алеврито-глинистые углеродсодержащие сланцы. Западная граница зоны приу-

**Рис. 3.** Геологическая карта и разрез рудопроявления Буреминское: 1 – четвертичные отложения; 2–17 – стратифицированные отложения: 2 – островная свита: известковистые песчаники, доломиты, алевролиты; 3–17 – углеродистые карбонатно-терригенные отложения среднего-верхнего рифея: 3, 4 – ослянская серия: 3 – дашкинская свита: известняки, мергели, аргиллиты, алевролиты, 4 – нижнеангарская свита: аргиллиты, алевролиты, кварцевые песчаники; 5–8 – киргитейская серия: 5 – мокринская свита: хлоритоидные сланцы с прослоями алевролитов, 6, 7 – рыбинская свита: 6 – верхняя пачка: глинисто-хлоритоидные сланцы, 7 – нижняя пачка: глинистые сланцы, 8 – киргитейская серия нерасчлененная: известковистые аргиллиты, известняки; 9–11 – тунгусикская серия: 9 – шунтарская свита: углисто-глинистые сланцы, известняки, 10, 11 – потоскуйская свита: 10 – верхняя подсвита: сланцы алевроито-глинистые, песчаники, 11 – нижняя подсвита: красноцветные глинистые сланцы, алевролиты; 12–17 – сухопитская серия: 12 – свиты аладынская и карточки объединенные: метадоломиты, метаизвестняки, сланцы серицитовые известковистые, 13 – погорюйская свита: сланцы алевроито-глинистые, прослои кварцитовидных песчаников, 14–16 – удерейская свита: 14 – верхняя подсвита: сланцы глинистые филлитизированные, 15 – средняя посвита: сланцы серицит-хлоритовые, алевролиты, 16 – нижняя подсвита: сланцы глинистые, филлитовидные, алевроито-глинистые; 17 – горбилоская свита: кварц-хлорит-серицитовые сланцы, зеленовато-серые хлорит-серицитовые сланцы; 18 – геологические границы: а) установленные, б) предполагаемые; 19 – разрывные нарушения: а) установленные, б) предполагаемые; 20 – рудоконтролирующие зоны складчато-разрывных деформаций; 21 – золотоносные минерализованные зоны; 22 – промышленные россыпи золота; 23 – точки литохимического опробования по вторичным ореолам рассеяния (глубина 0,6 м); 24 – линии проходки копушей (глубина 1,0–1,2 м, интервал 40 м) с комплексом литохимического по вторичным ореолам рассеяния, шлихового, сколкового и штуфного опробования элювиально-делювиальных отложений.

**Fig. 3.** Geological scheme of the ore occurrence Bureminskoe and geological section: 1 are the quaternary sediments; 2–17 are the stratified formations: 2 is the ostrovnaya series: calcareous sandstones, dolomites, siltstones; 3–17 are the carbonaceous carbonate-terrigeneous sediments of the Middle-Upper Riphean: 3, 4 is the oslyanskaya formation: 3 is the dashkinskaya series: limestones, marls, mudstones, siltstones, 4 is the nizhneangarskaya series: argillites, siltstones, quartz sandstones; 5–8 is the kirgiteyskaya formation: 5 is the mokrinskaya series: chloritoid schists with interlayers of siltstones, 6, 7 is the rybinskaya series: 6 is the upper layer: clay-chloritoid schists, 7 is the lower layer: clay schists, 8 is the kirgiteyskaya formation undifferentiated: calcareous mudstones, limestones; 9–11 is the tungusikskaya formation: 9 is the shuntarskaya series: carbonaceous clay schists, limestones, 10, 11 is the potoskuyskaya series: 10 is the upper subseries: aleurite-clay schists, sandstones, 11 is the lower subseries: red-colored clay schists, siltstones; 12–17 is the sukhopitskaya formation: 12 are the aladyinskaya and kartochki series combined: metadolomites, metalimestones, sericite calcareous schists, 13 is the pogoryuskaya series: aleurite-clay schists, interlayers of quartzite sandstones, 14–16 is the udereyskaya series: 14 is the upper subseries: clay schists phyllitized, 15 is the middle subseries: sericite-chlorite schists, siltstones, 16 is the lower subseries: clay, phyllitic, aleurite-clay schists; 17 is the gorbiloskaya series: quartz-chlorite-sericite schists, green-gray chlorite-sericite schists; 18 are the geological boundaries: a) determined, b) supposed; 19 are the faults: a) determined, b) supposed; 20 is the ore-controlling zone of fold-discontinuous deformations; 21 are the gold-bearing mineralized zones; 22 are the gold placers; 23 are the points of lithochemical sampling for secondary dispersion halos (depth 0,6 m); 24 are the lines of pit-mining (depth 1,0–1,2 m, interval 40 m) with a complex of lithochemical sampling for secondary dispersion halos, schlich, point and float sampling of eluvial-deluvial sediments

рочена к приядерной части антиклинали, сложенной породами нижеудерейской подсвиты (филлитовидные углеродсодержащие сланцы).

В пределах зоны рассланцевания широко распространены гидротермально-метасоматические процессы, главным образом сульфидизация и железо-магнезиальная карбонатизация. Последняя, наряду с сульфидизацией, является косвенным признаком, свидетельствующим о наличии золоторудного процесса [16]. Выделяется несколько разновидностей железо-магнезиальной карбонатизации: 1) тонкие прожилки, просечки, ориентированные по сланцеватости, развитые в пределах всей зоны рассланцевания; 2) крупная (до 3 мм) вкрапленность анкерита, распространенная в основном по периферии зоны рассланцевания; 3) тонкая вкрапленность ( $\leq 1$  мм) анкерита, сопутствующая сульфидной минерализации и распространенная преимущественно в пределах наиболее минерализованных участков; содержание вкрапленности достигает 60 %; 4) редкие секущие извилистые кварц-анкерит-сульфидные прожилки; 5) крупнокристаллический сидерит в кварцевых жильно-прожилковых образованиях.

Сульфидная минерализация представлена: 1) крупной ( $> 5$  мм) вкрапленностью кубического сингенетического (?) пирита; 2) тонкой ( $\leq 1$  мм) вкрапленностью сульфидов; от периферии к центру зоны рассланцевания содержание вкрапленности возрастает от 1–2 до 10–12 % и более; 3) редкой линзовидно-просечковидной вытянутой (1×4 мм) вкрапленностью сульфидов (пирротин?, арсенопирит?); 4) тонкопрожилковой сульфидизацией в составе кварц-анкеритовых редких прожилков.

Процессы (прожилково)-вкрапленной железо-магнезиальной и вкрапленной сульфидизации сопутствуют друг другу, образуя широкий (до 1 км) протяженный (до 10 км) ореол. Содержание карбонатов и сульфидов суммарно достигает 50–60 %.

Кварцевая жильно-прожилковая минерализация проявлена весьма неравномерно и наблюдается в основном в пределах наиболее минерализованных участков. Выделяется три разновидности кварцевых жил и прожилков: 1) тонкопрожилковая кварцевая минерализация в составе анкерит-сульфидных прожилков; 2) редкие тонкие (первые см) кварц-сидерит-мусковитовые жилы; 3) разноориентированные кварцевые прожилки, наблюдаемые в прослоях кварцевых песчаников и кварцитов погорюйской свиты. Жилы и прожилки первых двух генераций характерны для зон брекчирования.

В пределах главной зоны рассланцевания выявлена потенциально золотоносная минерализованная зона, приуроченная к углеродсодержащим карбонат-кварц-серпичитовым сланцам среднеудерейской подсвиты. Зона характеризуется невыдержанным извилистым строением (рис. 3). Мощность минерализованной зоны варьирует от 150 м в северной части участка, до 1300 м в южной. Прослеженная протяженность достигает 10 км. Пред-

положительно зона характеризуется сложным субсогласным линейно-изометричным штокверкоподобным строением.

Рудоконтролирующая зона складчато-разрывных деформаций и золотоносная минерализованная зона в ее пределах четко проявлены в АГХП. В пределах участка Буреминский выявлено два крупных АГХП золота – в северной и южной частях участка (рис. 4, а). Зона рассланцевания выражена в слабо аномальном поле – ее контур в целом соответствует содержаниям более 0,005 г/т золота в ВОР. Следует отметить отсутствие фоновой золотоносности стратифицированных образований удерейской и горбилоской свит на площади опробования, поэтому вышеуказанные низкие концентрации золота, тем не менее, свидетельствуют о наличии золотоносного процесса.

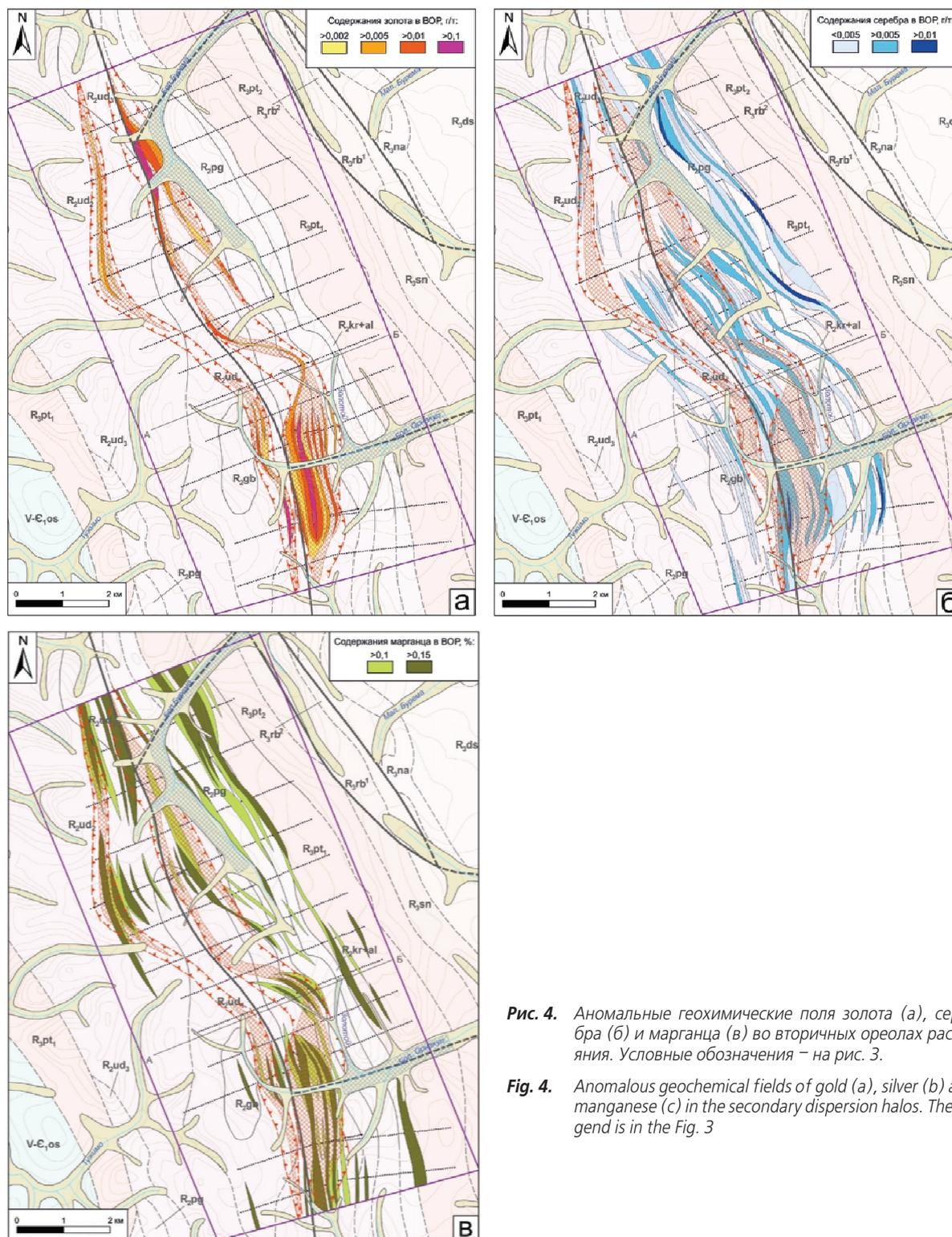
Золотоносная минерализованная зона выражена в АГХП содержаниями от 0,01 г/т. Аномальные содержания четко прослеживаются в ССЗ направлении, согласно простиранию вмещающих пород (рис. 4, а). Протяженность аномалий превышает 2 км, а мощность варьирует от 50 до 400 м. В пределах золотоносных минерализованных зон выявляются «стержневые» маломощные протяженные ореолы золота в ВОР с содержаниями более 0,1 г/т. Эти ореолы выявлены литохимическим по ВОР опробованием нижнего информативного малосмещенного горизонта элювиально-делювиальных отложений на глубине 1,0–1,2 м.

Среди сопутствующих элементов четко проявлены аномальные поля серебра в ВОР, приуроченные к периферийным участкам АГХП золота (рис. 4, б). Аномалии золота практически в точности совпадают с АГХП марганца (рис. 4, в). Природа последних, наиболее вероятно, связана с интенсивной марганецсодержащей железо-магнезиальной карбонатизацией в пределах минерализованных зон.

По данным шлихового опробования элювиально-делювиальных отложений на глубине 1,0–1,2 м установлено наличие шлихового золота в пределах минерализованных зон. Оно распределено достаточно равномерно, причем золото выявляется, в том числе, и в верхних водораздельных частях склонов. Среднее содержание шлихового золота составляет 3–5 знаков металла на шлиховую пробу. Золото характеризуется сложной морфологией, слабой окатанностью. Размер зерен варьирует от 0,1 до 0,6 мм.

#### Обсуждение результатов и выводы

Важным методическим аспектом проведенных работ является сопоставление литохимического опробования по ВОР на разных уровнях разреза элювиально-делювиальных отложений. На графиках распределения золота и некоторых сопутствующих элементов (серебро, марганец) (рис. 5) видно, что общий ореол повышенной золотоносности (зона рассланцевания) выделяется «стандартным» подпочвенным литохимическим опробова-



**Рис. 4.** Аномальные геохимические поля золота (а), серебра (б) и марганца (в) во вторичных ореолах рассеяния. Условные обозначения – на рис. 3.

**Fig. 4.** Anomalous geochemical fields of gold (a), silver (b) and manganese (c) in the secondary dispersion halos. The legend is in the Fig. 3.

нием по ВОР на глубине до 0,6 м, тогда как золотоносная минерализованная зона четко выявляется лишь опробованием нижнего надкоренного информативного слоя элювиально-делювиальных отложений на глубине 1,0–1,2 м.

Мощность перекрывающих отложений в пределах рудопроявления составляет от 0,5 м (на кру-

тых склонах и водоразделах) до 1,5 м (в низинах и долинах). Поэтому опробование на глубинах 1,0–1,2 м является достаточно информативным для локализации золотоносных минерализованных зон и потенциально рудных зон в их пределах. На рис. 6 показаны результаты опытно-методических работ. Литохимическое опробование по вто-

ричным ореолам рассеяния осуществлялось по вертикальным сечениям, расположенным на расстоянии 20 м со сгущением до 10 м над потенциально рудной зоной, с интервалом пробоотбора 0,2 м. Положение рудной зоны определялось по максимальной концентрации вкрапленной сульфидизации в элювиально-делювиальных обломках, сопровождающейся кварцевой прожилковой минерализацией. Из нижнего слоя элювиально-делювиальных образований, граничащего с коренными породами, также отбирались шлиховые пробы.

Опытно-методические работы показали, что ореолы низких концентраций (0,01–0,05 г/т) вытянуты вниз по склону на многие десятки и, вероятно, сотни метров и на изученном интервале не оконтурены. Ореолы содержания 0,05–0,1 г/т развиты более локально и смещены относительно потенциально зоны на расстояние около 50 м. Наиболее контрастные ореолы золота, в отличие от ореолов низких концентраций, не выходят на поверхность и смещены незначительно (до 20–30 м).

Шлиховым опробованием в рыхлых образованиях, непосредственно граничащих с золотоносной зоной, установлена знаковая золотоносность, причем максимальное количество знаков золота приурочено к гипсометрически пониженной части.

Таким образом, установлено, что горизонт опробования при поисковых работах по ВОР на глубине 0,3–0,4 м, залегающий под почвенно-растительным слоем, обеднен золотом по сравнению с надкоренными элювиально-делювиальными отложениями на глубине 1,0–1,2 м в несколько раз. Очевидно, что «нижний» информативный вторичный ореол отвечает положению коренной золотоносности. Это позволяет уже на раннем этапе поисков определить места проходки канав до коренных пород для локализации золоторудных зон.

АГХП серебра приурочено к флангам золотоносной минерализованной зоны. Это же относится и к АГХП марганца. Любопытно, что содержания марганца при подпочвенном опробовании оказываются выше, чем при опробовании надкоренного слоя элювиально-делювиальных отложений. Наиболее вероятно, это связано развитием гипергенным вторичных минералов, обогащенных марганцем.

Таким образом, применяемая экспрессная методика поисков золоторудных месторождений в сложных горно-таежных ландшафтах в условиях Енисейского кряжа позволила в течение одного короткого полевого сезона вновь выявить рудоконтролирующую зону складчато-разрывных деформаций участка Буреминский и потенциально золотоносные минерализованные зоны в ее пределах. Судя по существенно рассеянному золото-сульфидному составу золотой минерализации, а также по объемному характеру распределения АГХП золота предполагается выявление крупнообъемного золотого оруденения типа вкрапленных минерализованных зон с низкими средними содержаниями золота.

Полученные результаты позволяют предварительно выделить основные прогнозно-поисковые признаки золотой минерализации поискового участка Буреминский. Последнее, при наличии литохимических ореолов с содержанием более 0,1 г/т в ВОР, может быть отнесено к рангу рудопроявлений. По ряду признаков, таких как карбонатно-терригенный состав вмещающих отложений, объемный существенно вкрапленный рассеянный характер сульфидной минерализации, в качестве объекта-эталона автором предварительно выделяется известное Олимпиадинское золото-сульфидное месторождение [19–22]. Причем речь идет о ранних крупнообъемных вкрапленно-рассе-

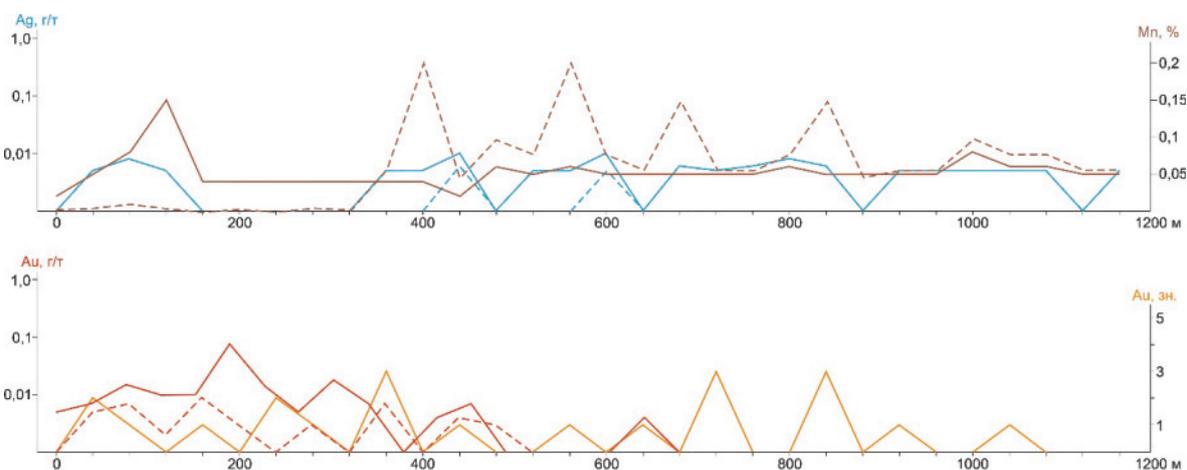


Рис. 5. Графики распределения золота и сопутствующих элементов во вторичных ореолах рассеяния по линии копушей № 1: сплошные линии – опробование по ВОР с глубины 1,0–1,2 м, пунктирные – 0,6 м

Fig. 5. Graphs of distribution of gold and accompanying elements in secondary dispersion halos by the cross-section line of pit-mining no. 1: full lines – sampling for secondary dispersion halos at the depth 1,0–1,2 m, dotted lines – 0,6 m

янных первичных бедных рудах этого месторождения, которые составляют 90 % всех его запасов [23, 24].

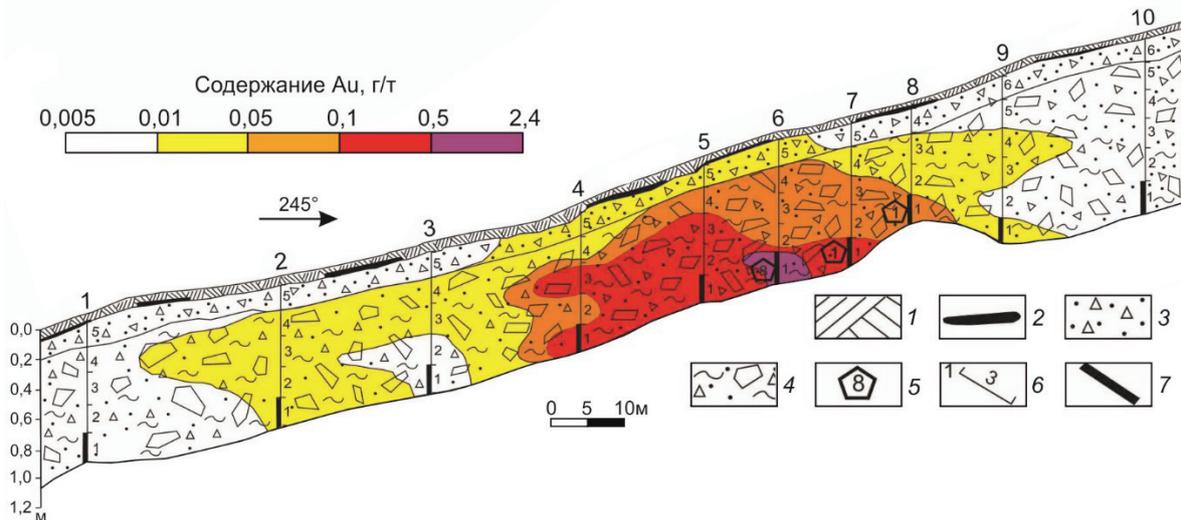
В таблице приводятся основные элементы прогнозно-поисковой модели рудопроявления Буреминское и объекта-эталона – Олимпиадинского месторождения. Исходя из приведенных данных можно выделить ряд сходных и отличительных элементов сопоставляемых объектов. В первую очередь следует отметить карбонатно-терригенный состав вмещающих отложений на сопоставляемых объектах и отсутствие четко выраженной метасоматической зональности [25]. Вмещающими вкрапленные руды Олимпиадинского месторождения являются измененные терригенно-карбонатные породы, сложенные карбонатами (преимущественно железистым кальцитом), кварцем и слюдами с примесью хлорита и углеродистого вещества [26]. Минерализованную зону рассеянной вкрапленности сульфидов рудопроявления Буреминское вмещают карбонатные измененные (серицитизация, железо-магнезиальная карбонатизация, окварцевание) породы – карбонат-кварц-серицитовые сланцы. Учитывая наличие слабых неконтрастных шлиховых ореолов золота с тонким и мелким металлом, можно предварительно заключить, что, так же, как и в первичных вкрапленных рудах Олимпиадинского месторождения, золотую минерализацию рудопроявления Буреминское характеризует тесная ассоциация золота с сульфидами, в которых оно находится в тонкодисперсном субмикроскопическом виде.

Таким образом, установлен ряд сходных признаков Олимпиадинского месторождения и рудопроявления Буреминское, среди которых выделяются: 1) карбонатный состав вмещающих пород; 2) отсутствие четко выраженной метасоматической зональности; 3) вкрапленный золото-сульфидный тип оруденения.

### Заключение

Результаты проведенных исследований позволили выявить новое рудопроявление коренного золота Буреминское на Енисейском кряже. Рудоконтролирующая зона складчато-разрывных деформаций рудопроявления характеризуется приуроченностью к зоне ССЗ разрывных нарушений, оперяющихся к Ишимбинской системе региональных разломов, в узле их сочленения с СВ разрывами. В пределах этой зоны выявлено две золотоносные минерализованные зоны, представленные интенсивно сульфидизированными и железо-магнезиально-карбонатизированными углеродсодержащими карбонат-кварц-серицитовыми сланцами. Золотая минерализация представляет собой крупнообъемную рассеянную сульфидную вкрапленность с низкими содержаниями золота. По ряду прогнозно-поисковых признаков (терригенно-карбонатный состав вмещающих отложений, вкрапленный тип оруденения и др.) в качестве объекта-эталона рассматривается Олимпиадинское золото-сульфидное месторождение.

Применяемая методика поисков золоторудных месторождений в сложных горно-таежных ланд-



**Рис. 6.** Распределение вторичных ореолов рассеяния золота над потенциально рудной зоной: 1 – почвенно-растительный слой; 2 – гумусовый слой; 3 – суглинок с дресвой и щебнем карбонат-кварц-серицитовых сланцев; 4 – элювиально-делювиальные отложения: обломки карбонат-кварц-серицитовых сланцев с примесью суглинка до 10–15 %; 5 – количество знаков золота в шлиховых пробах; 6 – номера сечений литохимического опробования по вторичным ореолам рассеяния; 7 – места отбора шлиховых проб

**Fig. 6.** Distribution of secondary gold dispersion halos over a potentially ore zone: 1 is the top soil; 2 is the humus layer; 3 is the loamy soil with grass and broken stone of carbonate-quartz-sericite schists; 4 are the eluvial-deluvial sediments: fragments of carbonate-quartz-sericite schists with impurity of loam up to 10–15 %; 5 is the quantity of gold signs in the schlich samples; 6 are the numbers of cross-sections of lithochemical sampling by secondary dispersion halos; 7 is the location of schlich sampling

шафтных условиях Енисейского кряжа позволила в течение одного полевого сезона выявить новое рудопроявление коренного золота. Новым и наиболее важным аспектом методики поисков является установленный факт, что наиболее высокие кон-

центрации золота в ВОР, соответствующие положению золотоносных минерализованных зон, выявляются опробованием нижнего надкоренного информативного слоя элювиально-делювиальных отложений на глубине 1,0–1,2 м.

**Таблица.** Сопоставление прогнозно-поисковых критериев и признаков Олимпиаднинского месторождения и рудопроявления Буреминское

**Table.** Comparison of the forecasting and prospecting criteria and features of the Olimpiadninskoe deposit and the Bureminskoe ore occurrence

Прогнозно-поисковые критерии и признаки Forecasting and prospecting criteria and features	Олимпиаднинское месторождение Olimpiadninskoe gold deposit	Буреминское рудопроявление Bureminskoe ore occurrence
Тектонические Tectonic	Тейско-Татарская металлогеническая зона, Енашимо-Верхне-Ерудинская подзона Teisko-Tatar metallogenic zone, Enashimo-Verkhne-Erudinsk subzone	Чернореченско-Каменская металлогеническая зона, граница Северо-Енисейско-Ишимбинской и Ангаро-Питской подзон Chernorechensk-Kamensk metallogenic zone, the boundary of the North-Yenisei-Ishimbinsk and Angara-Pitsk subzones
Геолого-структурные Geological-structural	Зона геодинамического влияния Татарского ССЗ разлома в узле сочленения и пересечения разрывами субширотной ориентировки; призматическая часть Медвежинской антиклинали; провис кровли гранитоидного массива Zone of geodynamic influence of the Tatar NNW fault in the junction and intersection with discontinuities of the sublatitudinal orientation; curve of fold zone of the Medvezhinsk anticline; overlying layer of granitoid massif	Зона геодинамического влияния Ишимбинского ССЗ разлома в узле сочленения с разрывами СВ ориентировки; приядерная часть Ишимбинской антиклинали Zone of geodynamic influence of the Ishimbinsk NNW fault in the junction with the discontinuities of the NE orientation; core of fold zone of the Ishimbinsk anticline
Литолого-стратиграфические Lithological-stratigraphic	Углеродсодержащий карбонатно-терригенный комплекс, кординская свита (R <sub>kd</sub> ), среднекординская подсвита – слюдиисто-кварц-карбонатные сланцы с прослоями известняков Carbonaceous carbonate-terrigenous complex, Kordian series (R <sub>kd</sub> ), Middle Kordian subseries – mica-quartz-carbonate schists with interlayers of limestones	Углеродсодержащий (вулканогенно)-карбонатно-терригенный комплекс, удерейская свита (R <sub>ud</sub> ), среднеудерейская подсвита – карбонат-кварц-серицитовые углеродсодержащие сланцы Carbonaceous (volcanogenic)-carbonate-terrigenous complex, Uderean series (R <sub>ud</sub> ), Middle Uderean subseries – carbonate-quartz-sericite carbonaceous schists
Метаморфические Metamorphic	Зона биотитовой ступени зеленосланцевой фации регионального метаморфизма, возрастающего до эпидот-амфиболитовой фации Zone of biotite stage of greenschist facies of regional metamorphism, growing up to the epidote-amphibolite facies	Зона хлорит-серицитовая субфации зеленосланцевой фации регионального метаморфизма Zone of chlorite-sericite subfacies of the greenschist facies of regional metamorphism
Гидротермально-метасоматические Hydrothermal-metasomatic	1) высокотемпературные контактово-метасоматические изменения (грейзенизация, скарнирование и др.); 2) ореолы вкрапленной сульфидизации; 3) околорудные изменения березитового типа 1) high-temperature contact-metasomatic alteration (greysenization, skarning et al.); 2) halos of disseminated sulphidisation; 3) berezitic type alteration	1) ореолы вкрапленной сульфидизации и железомagneзиальной карбонатизации; 2) локальные околорудные сульфидно-кварц-серицитовые изменения 1) halos of disseminated sulphidisation and iron-magnesian carbonatization; 2) local sulphide-quartz-sericite alteration
Минералогические Mineralogical	нерудные минералы – кварц, карбонаты, слюды (мусковит, серицит, биотит), хлорит; рудные минералы – арсенопирит, пирротин, пирит, бертьерит, золото non-metallic minerals – quartz, carbonates, mica (muscovite, sericite, biotite), chlorite; ore minerals – arsenopyrite, pyrrhotine, pyrite, berthierite, gold	нерудные минералы – серицит, карбонаты, кварц; рудные минералы – пирит, редко пирротин, золото non-metallic minerals – sericite, carbonates, quartz; ore minerals –pyrite, rarely pyrrhotine, gold
Морфологические Morphological	1) крупнообъемная зона-залежь бедных рассеянных вкрапленных первичных золото-сульфидных руд (до 3,0 г/т); 2) золото-сурьмяные богатые (>3,0 г/т) жильно-прожилковые зоны 1) large-volume zone-bed deposit of poor disseminated primary gold-sulfide ores (up to 3,0 g/t); 2) gold-antimony rich (>3,0 g/t) vein-veinlet zones	1) крупнообъемная минерализованная зона рассеянной сульфидной вкрапленности; 2) маломощные жильно-прожилковые секущие зоны 1) large-volume mineralized zone of dispersed sulfide dissemination; 2) low-thickness vein-veinlet transversal zones

**Окончание таблицы**

**Table**

Прогнозно-поисковые критерии и признаки Forecasting and prospecting criteria and features	Олимпиаднинское месторождение Olimpiadninskoe gold deposit	Буреминское рудопроявление Bureminskoe ore occurrence
Минералого-геохимические Mineralogical-geochemical	1) широкие слабоконтрастные АГХП золота в ВОР и элементов-спутников (сурьма, мышьяк, вольфрам); 2) широкие слабоконтрастные шлиховые ореолы с тонким и мелким золотом – первые десятки, редко сотни знаков металла на шлиховую пробу 1) wide low-contrast anomalous geochemical aureoles of gold in secondary dispersion halos and satellite elements (antimony, arsenic, tungsten); 2) wide low-contrast schlich halos with fine gold – the first dozens, rarely hundreds of metal signs per schlich sample	1) широкие (до 300 м) АГХП золота в ВОР с содержаниями 0,01–0,1 г/т; по периферии АГХП золота – аномалии серебра, марганца; 2) широкие слабоконтрастные шлиховые ореолы тонкого и мелкого золота (0,1–0,6 мм) с невысоким содержанием металла – 3–5 знаков на шлиховую пробу в пределах минерализованной зоны 1) wide (up to 300 m) anomalous geochemical aureoles of gold in secondary dispersion halos with the contents 0,01–0,1 g/t; on the periphery of anomalous geochemical aureoles of gold – anomalies of silver, manganese; 2) wide low-contrast schlich halos with fine gold (0,1–0,6 mm) with a low metal content – 3–5 signs per schlich sample within the mineralized zone
Геофизические Geophysical	1) положительные аномалии магнитного поля; 2) слабо отрицательные аномалии поля силы тяжести 1) positive anomalies of the magnetic field; 2) low-negative gravity field anomalies	1) зона «распада» структуры градиента магнитного поля – слабо положительная аномалия; 2) слабо положительная аномалия поля силы тяжести 1) zone of «decay» of the structure of the magnetic field gradient – low-positive anomalies; 2) low-positive gravity field anomalies

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- Distribution, character and genesis of gold deposits in metamorphic terranes / R. Goldfarb, T. Baker, B. Dube, D.I. Groves, C.J. Hart., P. Gosselin // Society of Economic Geologists. – 2005. – № 5. – P. 407–450.
- Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types / D.I. Groves, R.J. Goldfarb, M. Gebre-Mariam, S.G. Hagemann, F. Robert // Ore geology reviews. – 1998. – V. 13. – № 1. – P. 7–27.
- Metallogeny of Siberia: tectonic, geologic and metallogenic settings of selected significant deposits / R. Seltmann, S. Soloviev, V. Shatov, F. Pirajno, E. Naumov, S. Cherkasov // Australian Journal of Earth Sciences. – 2010. – V. 57. – № 6. – P. 655–706.
- Фисенко В.Г. Предпосылки и признаки золоторудной минерализации северо-восточного склона Енисейского кряжа и перспективы промышленной золотоносности: автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук. – Красноярск, 2016. – 18 с.
- Модели месторождений золота Енисейской Сибири / С.С. Сердюк, Ю.Е. Коморовский, А.И. Зверев, В.К. Оябрь, В.С. Власов, В.Е. Бабушкин, В.А. Кириленко, С.А. Землянский. – Красноярск: СФУ, 2010. – 584 с.
- Yakubchuk A., Stein H., Wilde A. Results of pilot Re-Os dating of sulfides from the Sukhoi Log and Olympiada orogenic gold deposits, Russia // Ore Geology Reviews. – 2014. – V. 59. – P. 21–28.
- Волков А.В. Крупнотоннажные месторождения в мировой и российской золотодобыче // Золото и технологии. – 2012. – № 2 (16). – С. 38–46.
- Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. – М.: Недра, 1982. – 256 с.
- Иванов А.И. Роль метаморфизма в золотом рудообразовании в углеродистых терригенных и карбонатно-терригенных комплексах на примере Байкало-Патомской металлогенической провинции и его отражение в прогнозно-поисковых моделях // Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений благородных и цветных металлов – состояние и перспективы: Сборник тез. докл. научно-практ. конф. – М.: ЦНИГРИ, 2015. – С. 61–62.
- Powell R., Will T.M., Phillips G.N. Metamorphism in Archaean greenstone belts: calculated fluid compositions and implications for gold mineralization // Journal of Metamorphic Geology. – 1991. – V. 9. – № 2. – P. 141–150.
- Phillips G.N., Powell R. Formation of gold deposits: a metamorphic devolatilization model // Journal of Metamorphic Geology. – 2010. – V. 28. – № 6. – P. 689–718.
- Yardley B.W.D., Cleverley J.S. The role of metamorphic fluids in the formation of ore deposits // Geological Society, London, Special Publications. – 2015. – V. 393. – № 1. – P. 117–134.
- Bonnemaison M., Marcoux E. Auriferous mineralization in some shear-zones: a three-stage model of metallogenesis // Mineralium Deposita. – 1990. – V. 25. – № 2. – P. 96–104.
- Мансуров Р.Х., Зеликсон Б.С., Тарасов А.В. Рудоконтролирующие зоны складчато-разрывных деформаций в средне-верхнерифейских карбонатно-терригенных комплексах Енисейской золоторудной провинции // Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений цветных и благородных металлов, алмазов – состояние и перспективы: сборник тезисов докладов научно-практической конференции. – М.: ЦНИГРИ, 2016. – С. 98–99.
- Иванов А.И. Экспрессный метод поисков золоторудных месторождений в сложных горно-таежных ландшафтах // Руды и металлы. – 2014. – № 1. – С. 36–42.
- Иванов А.И. Золото Байкало-Патомы (геология, оруденение, перспективы). – М.: ФГУП ЦНИГРИ, 2017. – 215 с.
- Мансуров Р.Х., Зеликсон Б.С., Курмаев А.В. Применение экспрессной методики поисков золоторудных месторождений в горно-таежных ландшафтах на примере поисковых работ на большеобъемное золотое оруденение в пределах Средне-Ишимбинской площади // Руды и металлы. – 2015. – № 4. – С. 39–50.
- Мансуров Р.Х., Зеликсон Б.С. Методические аспекты применения шлихогеохимического метода при поисках золота в условиях Енисейского кряжа // Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений цветных и благо-

- родных металлов, алмазов – состояние и перспективы: Сборник тез. докл. научно-практ. конф. – М.: ЦНИГРИ, 2016. – С. 40–41.
19. Типоморфизм арсенопирита золоторудных месторождений Благодатное и Олимпиада (Енисейский край) / А.М. Сазонов, С.Д. Кирик, С.А. Сильянов, О.А. Баюков, П.А. Тишин // Минералогия. – 2016. – № 3. – С. 53–70.
20. A multidisciplinary study of invisible gold in arsenopyrite from four mesothermal gold deposits in Siberia, Russian Federation / A.D. Genkin, N.S. Bortnikov, L.J. Cabri, L.J. Cabri, F.E. Wagner, C.J. Stanley, Yu.G. Safonov, G. McMahon, J. Friedl, A.L. Kerzin, G.N. Gamyarin // Economic Geology. – 1998. – V. 93. – № 4. – P. 463–487.
21. Gold Deposits of the Yenisei Ridge (Russia) and Age of Its Formation / A.S. Borisenko, A.M. Sazonov, P.A. Nevolko, E.A. Naumov, S. Tessalina, K.R. Kovalev, V.P. Sukhorukov // Acta Geologica Sinica. – 2014. – V. 88. – № 2. – P. 686–687.
22. Re-Os Isotope Systematics of Sulfides from Olympiada Gold Deposit (Yenisei Ridge, Russia) / E.A. Naumov, S. Tessalina, A.S. Borisenko, P.A. Nevolko, K.R. Kovalev // Mineralogical Magazine. Goldschmidt 2013. – 2013. – V. 77. – № 5. – P. 1830.
23. Кряжев С.Г. Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2017. – 28 с.
24. Неволько П.А., Борисенко А.С. Этапы формирования золотого и сурьмяного оруденения Енисейского края и их корреляция с периодами проявления магматизма // Металлогения древних и современных океанов. – 2009. – Т. 15. – С. 37–42.
25. Золотые руды месторождения Олимпиада (Енисейский край, Сибирь) / А.Д. Генкин, В.А. Лопатин, Р.А. Савельев, Ю.Г. Сафонов, Н.Б. Сергеев, А.Л. Керзин, А.И. Цепин, Х. Амштутц, Э.Б. Афанасьева, Ф. Вагнер, Г.Ф. Иванова // Геология рудных месторождений. – 1994. – Т. 36. – № 2. – С. 111–136.
26. Ли Л.В. Олимпиадинское месторождение вкрапленных золото-сульфидных руд. – Красноярск: КНИИГиМС, 2003. – 120 с.

Поступила 12.02.2018 г.

#### Информация об авторах

**Мансуров Р.Х.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник отдела благородных металлов Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов.

UDC 550.812:553.073

## METHODICAL ASPECTS OF FORECASTING AND PROSPECTING FOR LARGE-VOLUME GOLD DEPOSITS ON THE EXAMPLE OF THE YENISEI RIDGE

Rinat Kh. Mansurov,  
rinman81@bk.ru

Central research institute of geological prospecting for base and non-ferrous metals,  
129, bld. 1, Varshavskoe Shosse, Moscow, 117545, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need of study and involvement of a new large-volume gold deposits in production. This can be contributing to the establishment and long-term development of whole regions of Russia. The main aspect is the engineering of a new and improvement of existing methods for prospecting gold deposits.

**The main aim** of the research is the approbation of the methodology for prospecting gold deposits in difficult mountain-taiga landscapes applied to the conditions of the Yenisei Ridge, in particular, within the poorly known eastern part of this region, as well as identification of forecasting and prospecting criteria and features of newly discovered gold ore occurrence Bureminskoe, and their comparison with those of the known large-volume gold-sulfide Olimpiadninskoe deposit.

**Methods:** analysis of literary and fund data; forecasting construction to determine prospecting areas for identifying a large-volume gold mineralization; development of new and improvement of existing methods and techniques for prospecting gold deposits; application of these methods in practice (lithochemical sampling for secondary dispersion halos of different levels of the cross-section of eluvial-deluvial sediments, schlich and point sampling; laboratory and analytical research (semiquantitative spectral analysis for 26 elements, chemical spectral analysis for gold).

**Results.** The authors have detected a new ore-controlling zone of fold-discontinuous deformations of the gold ore occurrence Bureminskoe. It is confined to the zone of faults of the north-north-west orientation, fledging to the Ishimbinsk fault system, at the junction of their articulation with faults of the NE direction. A several gold-bearing mineralized zones within the cleavage zone are detected by a complex of schlich and lithochemical sampling for secondary dispersion halos of the informative low-shifted horizon of eluvial-deluvial sediments. The gold-bearing mineralized zones are represented by zones-deposits of disseminated gold-sulfide mineralization localized in intensely iron-magnesian-carbonatized carbonaceous carbonate-quartz-sericite schists of the Uderey sediments of the Sukhopitsk series of the Middle Riphean. The forecasting and prospecting criteria and features for gold mineralization of the ore occurrence Bureminskoe are identified. The primary poor disseminated gold-sulfide ores of the Olimpiadninskoe deposit are the closest analogue of the ore occurrence Bureminskoe. The authors compared the main geological elements of the ore occurrence Bureminskoe with disseminated gold-sulfide ores of Olimpiadninskoe deposit.

### Key words:

Methods of prospecting for gold deposits, Yenisei Ridge, large-volume disseminated gold-sulfide mineralization, gold ore occurrence Bureminskoe, Olimpiadninskoe gold deposit, forecasting and prospecting criteria and features.

### REFERENCES

1. Goldfarb R., Baker T., Dube B., Groves D.I., Hart C.J., Gosselein P. Distribution, character and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. *Society of Economic Geologists*, 2005, no. 5. pp. 407–450.
2. Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore geology reviews*, 1998, vol. 13, no. 1, pp. 7–27.
3. Seltmann R., Soloviev S., Shatov V., Pirajno F., Naumov E., Cherkasov S. Metallogeny of Siberia: tectonic, geologic and metallogenic settings of selected significant deposits. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2010, vol. 57, no. 6, pp. 655–706.
4. Fisenko V.G. *Predposylki i priznaki zolotorudnoy mineralizatsii severo-vostochnogo sklona Eniseyskogo kryazha i perspektivy promyshlennoy zolotonosnosti*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Background and features of gold mineralization of the north-eastern slope of the Yenisei ridge and prospects of industrial gold content. Cand. Diss. Abstract]. Krasnoyarsk, 2016. 18 p.
5. Serdyuk S.S., Komorovsky Yu.E., Zverev A.I., Oyaber V.K., Vlasov V.S., Babushkin V.E., Kirilenko V.A., Zemlyansky S.A. *Modeli mestorozhdeniy zolota Eniseyskoy Sibiri* [Gold deposits models of Yeniseian Siberia]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2010. 584 p.
6. Yakubchuk A., Stein H., Wilde A. Results of pilot Re–Os dating of sulfides from the Sukhoi Log and Olympiada orogenic gold deposits, Russia. *Ore Geology Reviews*, 2014, vol. 59, pp. 21–28.
7. Volkov A.V. Bulk-tonnage deposits in World and Russian gold mining. *Gold and Technology*, 2012, no 2 (16), pp. 38–46. In Rus.
8. Buryak V.A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* [Metamorphism and ore genesis]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 256 p.
9. Ivanov A.I. Rol metamorfizma v zolotom rudoobrazovanii v ugle-rodistykh terrigennykh i karbonatno-terrigenykh kompleksakh na primere Baykalo-Patomskoy metallogenicheskoy provintsii i ego otrazhenie v prognozno-poiskovykh modelyakh [The role of metamorphism in gold ore mineralization in carbonaceous terrigenous and carbonate-terrigenous complexes by the example of Baikal-Patom metallogenic province and its reflection in forecast-search models]. *Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov i otsenki mestorozhdeniy tsvetnykh i blagorodnykh metallov, almazov – sostoyanie i perspektivy*. Sbornik tezisev dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii [Science and methodology bases of forecasting, prospecting and evaluating deposits of non-ferrous and precious metals, diamonds – state and prospects. Abstracts of the scientific-practical conference]. Moscow, TsNIGRI Publ., 2015. pp. 61–62.
10. Powell R., Will T.M., Phillips G.N. Metamorphism in Archaean greenstone belts: calculated fluid compositions and implications for gold mineralization. *Journal of Metamorphic Geology*, 1991, vol. 9, pp. 141–150.
11. Phillips G.N., Powell R. Formation of gold deposits: a metamorphic devolatilization model. *Journal of Metamorphic Geology*, 2010, vol. 28, pp. 689–718.
12. Yardley B.W.D., Cleverley J.S. The role of metamorphic fluids in the formation of ore deposits. *Geological Society, London, Special Publications*, 2015, vol. 393, pp. 117–134.

13. Bonnemaïson M., Marcoux E. Auriferous mineralization in some shear-zones: a three-stage model of metallogenesis. *Mineralium Deposita*, 1990, vol. 25, pp. 96–104.
14. Mansurov R.Kh., Zelikson B.S., Tarasov A.V. Rudokontroliruyushchie zony skladchato-razryvnykh deformatsiy v sredneverkhneriferayskikh karbonatno-terrigenykh kompleksakh Eniseyskoy zolotorudnoy provintsii [Ore-controlling zones of fold-discontinuous deformations in carbonate-terrigenous sediments of the Upper-Middle Riphean within the Yenisei gold province]. *Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov i otsenki mestorozhdeniy tsvetnykh i blagorodnykh metallov, almazov – sostoyaniye i perspektivy. Sbornik tezisev dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science and methodology bases of forecasting, prospecting and evaluating deposits of non-ferrous and precious metals, diamonds – state and prospects. Abstracts of the scientific-practical conference]. Moscow, TsNIGRI Publ., 2016. pp. 98–99.
15. Ivanov A.I. A set of bedrock gold-oriented techniques and methods for exploration in the mountainous taiga environments. *Ores and Metals*, 2014, no. 1, pp. 36–42. In Rus.
16. Ivanov A.I. *Zoloto Baykalo-Patoma (geologiya, orudnenie, perspektivy)* [Gold of the Baikal-Pathom (geology, ore mineralization, prospects)]. Moscow, TsNIGRI Publ., 2017. 215 p.
17. Mansurov R.Kh., Zelikson B.S., Kurmaev A.V. Express method of prospecting gold deposits in difficult mountain-taiga landscapes on the example of prospecting lode gold mineralization within the Sredne-Ishimbinskaya area. *Ores and Metals*, 2015, no. 4, pp. 39–50. In Rus.
18. Mansurov R.Kh., Zelikson B.S. Metodicheskie aspekty primeniya shlikhogeokhimicheskogo metoda pri poiskakh zolota v usloviyakh Eniseyskogo kryazha [Methodical aspects of application of schlich and geochemical methods in prospecting gold mineralization in the Yenisei ridge conditions]. *Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov i otsenki mestorozhdeniy tsvetnykh i blagorodnykh metallov, almazov – sostoyaniye i perspektivy. Sbornik tezisev dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science and methodology bases of forecasting, prospecting and evaluating deposits of non-ferrous and precious metals, diamonds – state and prospects. Abstracts of the scientific-practical conference]. Moscow, TsNIGRI Publ., 2016. pp. 40–41.
19. Sazonov A.M., Kirik S.D., Silyanov S.A., Bayukov O.A., Tishin P.A. Typomorphism of arsenopyrite in gold deposits Blagodatnoe and Olympiada (Yenisei Ridge). *Mineralogy*, 2016, no. 3, pp. 53–70. In Rus.
20. Genkin A.D., Bortnikov N.S., Cabri L.J., Cabri L.J., Wagner F.E., Stanley C.J., Safonov Yu.G., McMahon G., Friedl J., Kerzin A.L., Gamyani G.N. A multidisciplinary study of invisible gold in arsenopyrite from four mesothermal gold deposits in Siberia, Russian Federation. *Economic Geology*, 1998, vol. 93, no. 4, pp. 463–487.
21. Borisenko A.S., Sazonov A.M., Nevolko P.A., Naumov E.A., Tesselina S., Kovalev K.R., Sukhorukov V.P. Gold Deposits of the Yenisei Ridge (Russia) and Age of Its Formation. *Acta Geologica Sinica*, 2014, vol. 88, no. 2, pp. 686–687.
22. Naumov E.A., Tesselina S., Borisenko A.S., Nevolko P.A., Kovalev K.R. Re-Os Isotope Systematics of Sulfides from Olympiada Gold Deposit (Yenisei Ridge, Russia). *Mineralogical Magazine*, 2013, vol. 77, no. 5, pp. 1830.
23. Kryazhev S.G. *Geneticheskie modeli i kriterii prognoza zolotorudnykh mestorozhdeniy v uglerodisto-terrigenykh kompleksakh. Avtoreferat Dis. Dokt. Nauk* [Genetic models and criteria for forecasting gold deposits in carbon-terrigenous complexes. Dr. Diss. Abstract]. Moscow, 2017. 28 p.
24. Nevolko P.A., Borisenko A.S. Stages of formation of gold and antimony mineralization of the Yenisei Ridge and their correlation with the periods of magmatic activation. *Metallogeny of ancient and modern oceans*, 2009, vol. 15, pp. 37–42. In Rus.
25. Genkin A.D., Lopatin V.A., Savelyev R.A., Safonov Yu.G., Sergeev N.B., Kerzin A.L., Tsepina A.I., Amshtutts Kh., Afanasyeva Z.B., Vagner F., Ivanova G.F. Gold ores of the Olimpiada deposit (Yenisei Ridge, Siberia). *Geology of Ore Deposits*, 1994, vol. 36, no. 2, pp. 111–136. In Rus.
26. Li L.V. *Olimpiadninskoye mestorozhdenie vkraplennykh zoloto-sulfidnykh rud* [Olimpiadninskoye deposit of disseminated gold-sulphide ores]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Publ., 2003. 120 p.

Received: 12 February 2018.

#### Information about the authors

**Rinat Kh. Mansurov**, Cand. Sc., assistant, Senior Researcher, Central research institute of geological prospecting for base and non-ferrous metals.

УДК 66.096.5

## ПЕЧЬ КИПЯЩЕГО СЛОЯ ДЛЯ ОБЖИГА ЦИНКОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ КАК ОБЪЕКТ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Ивакина Светлана Анатольевна<sup>1</sup>,  
svetlana-ivakina@mail.ru

Мунц Владимир Александрович<sup>1</sup>,  
v.a.munts@urfu.ru

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

**Актуальность** исследования обусловлена непрерывным увеличением использования цинка в мире. Получение цинка – дорогостоящий процесс, одним из этапов которого является обжиг сульфидных цинковых концентратов (шихты) в печи кипящего слоя с использованием воздушного дутья, обогащенного кислородом. Поскольку гранулометрический состав шихты, ее влажность и состав непостоянны, температура кипящего слоя может изменяться и требует непрерывного контроля со стороны оператора. Огромная масса слоя определяет большую инерционность слоя, поэтому необходимо использование системы автоматического регулирования.

**Цель исследования:** оптимизация работы печи кипящего слоя для обжига сульфидных цинковых концентратов, в частности, введение автоматического регулирования температуры кипящего слоя во избежание колебания температуры в широких пределах. Значительное понижение температуры слоя приводит к ухудшению обжига концентрата, как следствие, уменьшается выход конечного продукта – цинка. При повышении температуры существенно возрастает опасность шлакования слоя из-за возможных его локальных перегревов. Для этого необходимо на основе изученной кинетики окисления цинкового концентрата в печи кипящего слоя получить зависимость температуры слоя от расхода шихты как расчетным, так и экспериментальным путем.

**Объект:** печь кипящего слоя Челябинского цинкового завода для обжига сульфидного цинкового концентрата.

**Методы:** получение расчетной зависимости температуры кипящего слоя от расхода шихты на основе изученной кинетики окисления цинкового концентрата; экспериментальное изучение динамики изменения температуры слоя при изменении расхода шихты.

**Результаты.** Разработана математическая модель переходных процессов в печи кипящего слоя для обжига цинковых концентратов, позволяющая рассчитать изменение температуры слоя и концентрации горючих веществ в нем при изменении расхода загружаемой в печь шихты. Сопоставление расчетов с экспериментальными данными показали хорошую сходимость результатов. На основании полученных данных создана приближенная модель печи кипящего слоя в ПТК «Овация» и разработан алгоритм регулятора температуры кипящего слоя. Внедрение на ПАО «ЧЦЗ» регулятора температуры позволит без участия оператора поддерживать заданную температуру кипящего слоя, постоянство горючих в слое, исключить недожог шихты и снизить опасность шлакования слоя.

### Ключевые слова:

Цинковый концентрат, кипящий слой, автоматическое регулирование, постоянная времени, константа скорости химического реагирования.

### Введение

Сульфидный цинковый концентрат получают методом флотации из размолотой руды, размер частиц составляет менее 74 мкм [1, 2]. В процессе погрузки–разгрузки, транспортировки образуются конгломераты из частиц концентрата, что делает материал полидисперсным с размерами частиц от нескольких микрометров до нескольких миллиметров [3]. При его обжиге в печи кипящего слоя происходит сепарация частиц по размеру. Мелкодисперсные частицы выносятся из слоя газовыми потоками, в дальнейшем частицы улавливаются в агрегатах очистки газов (котел-утилизатор, циклоны, электрофильтры). Более крупные частицы и часть мелкодисперсных частиц образуют кипящий слой. Обжиг цинкового концентрата происходит в кипящем слое при постоянном контакте частиц друг с другом и потоками газа [4–7]. Частицы, вынесенные из слоя газовыми потоками, окисляются в надслоевом пространстве печи и в газоходах. Здесь расстояние между частицами достаточно большое и частицы контактируют только с газовой

ми потоками (обжиг во взвешенном состоянии). Доля вынесенных частиц из слоя зависит от соотношения скоростей газовых потоков и физических свойств частиц (размер, плотность, форма). Для печей кипящего слоя Челябинского цинкового завода ориентировочно можно считать, что продукты обжига делятся в следующем соотношении: огарок (продукт из кипящего слоя) – (30–40) %, циклонная пыль – (50–60) %, пыль электрофильтров ≈ 5 %. Огарок в среднем находится в печи несколько часов при температурах от 900 до 980 °С. Температура в надслоевом пространстве печи практически равна температуре кипящего слоя, но в дальнейшем снижается до 500 °С в циклонах, до 350 °С в электрофильтрах.

Кипящий слой как объект регулирования обладает специфическими свойствами и требует введения такого дополнительного (по сравнению с традиционными методами сжигания) параметра регулирования, как температура кипящего слоя [8–10]. Значительное понижение температуры слоя приводит к ухудшению обжига концентрата,

как следствие, уменьшается выход конечного продукта – цинка. При температуре менее 850 °С скорость окисления шихты становится недостаточной для поддержания горения, что может привести к потуханию и прекращению кипения. При температуре более 950 °С существенно возрастает опасность шлакования слоя из-за возможных его локальных перегревов.

Поскольку гранулометрический состав шихты, ее влажность и состав непостоянны, то температура кипящего слоя может изменяться и требует непрерывного контроля со стороны оператора [11]. На ПАО «ЧЦЗ» регулирование температуры слоя осуществляется путем изменения оператором частоты вращения электродвигателя ленточного транспортера (косвенный показатель количества загружаемой шихты в печь), без изменения количества подаваемого кислорода в печь. Огромная масса слоя определяет большую инерционность слоя, что требует использования системы автоматического регулирования [12–15]. Для ее внедрения необходимо на основе изученной кинетики окисления цинкового концентрата в печи кипящего слоя получить зависимость температуры слоя от расхода шихты как расчетным, так и экспериментальным путем, разработать алгоритм регулятора температуры и приближенную модель кипящего слоя.

### Экспериментальное определение динамики изменения температуры слоя при изменении расхода шихты

Для управления технологическим процессом обжига сульфидных цинковых концентратов в печах кипящего слоя ПАО «ЧЦЗ» используется комплекс первичных и вторичных датчиков, объединенных в рабочую станцию на базе персонального компьютера. Система позволяет выводить на монитор ПК данные по температуре в различных точках печи и газового тракта, данные по расходу воздуха и кислорода, подаваемых в печь, давление (разрежение) в различных точках печи, индикацию работы оборудования (рис. 1).

Схема пода печи кипящего слоя представлена на рис. 2. На схеме обозначены: сектор А – форкамера, сектор В – сектор интенсивного окисления шихты, в секторах С установлены кессоны для охлаждения слоя, сектор D – сектор выгрузки огарка из печи. Номерами 1, 3, 4, 5, 6 обозначены термопары, установленные на высоте 20–30 см от пода, выход термопары в печь на 5–10 см от боковой стенки печи. Воздушное дутье, обогащенное кислородом до 25–35 %, подается в форкамеру печи и следующую за форкамерой половину печи (сектор В и половину сектора С в области расположения термопар 3 и 4). В оставшиеся сектора подается воздух. Кипящий слой с хорошей аэродинами-

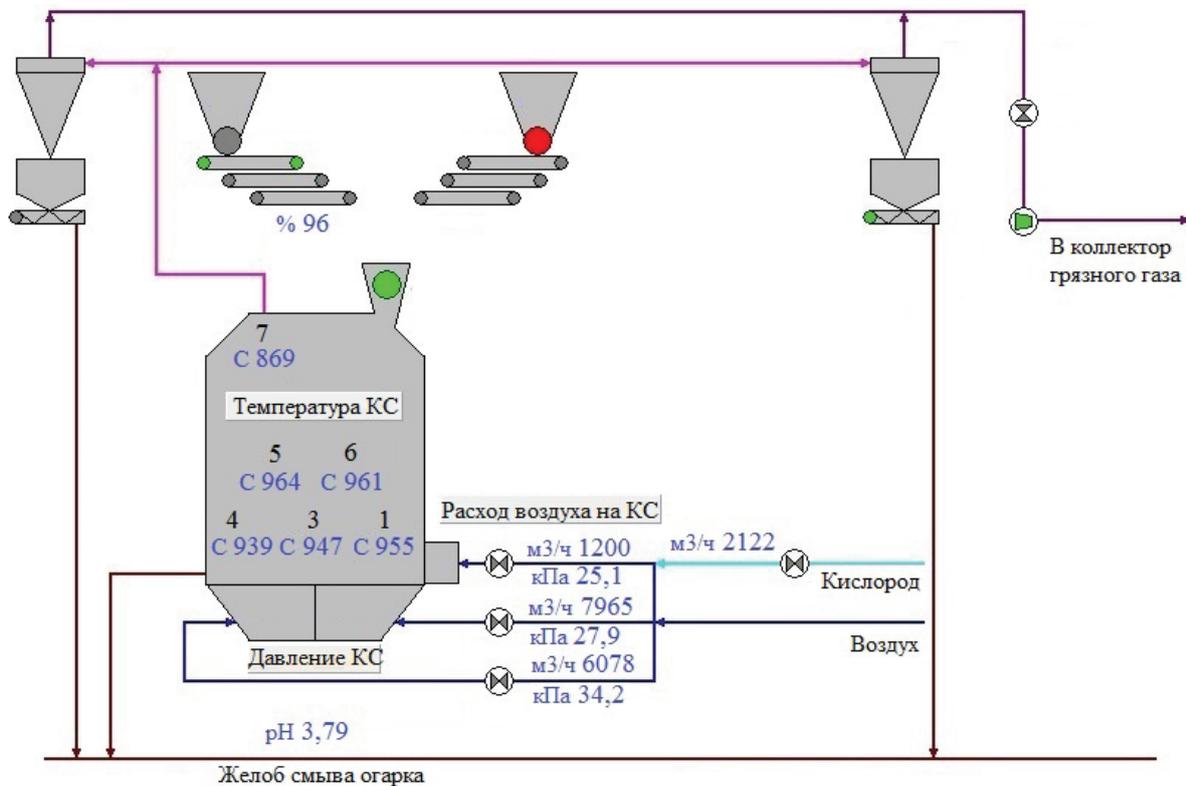


Рис. 1. Видеограмма контроля и управления процессом обжига цинкового концентрата

Fig. 1. Videogram of monitoring and control of zinc concentrate roasting

кой обладает высокой теплопроводностью, и разница температур в слое между точками 1 и 5 не превышает 35 °С (3,5 %), поэтому слой можно считать изотермичным (рис. 3).

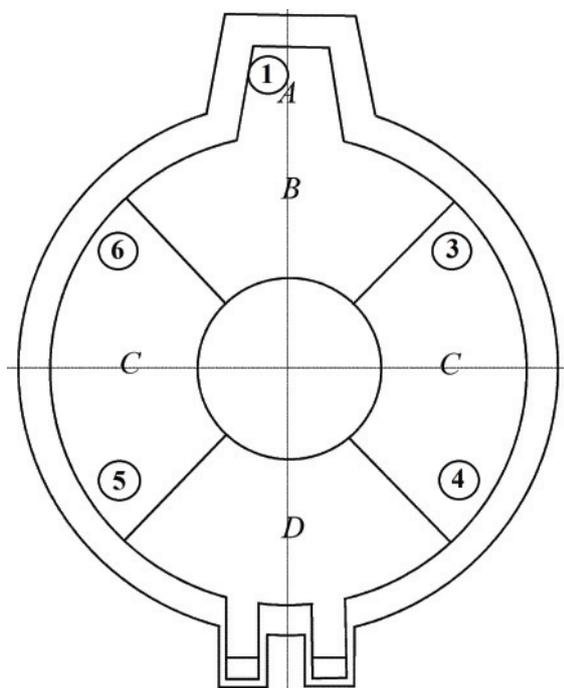


Рис. 2. Расположение термопар по поду печи

Fig. 2. Location of thermocouples by the furnace

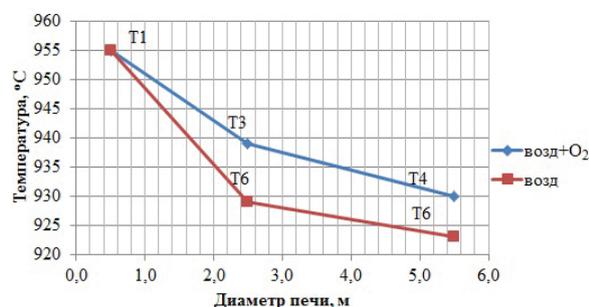


Рис. 3. Распределение температур в кипящем слое от зоны загрузки до зоны выгрузки шихты

Fig. 3. Distribution of temperatures in the fluidized bed from the loading zone to the discharge zone

Для определения взаимосвязи между частотой электропривода ленточного транспортера и температурой кипящего слоя построены графики изменения данных параметров в режиме реального времени в различных точках печи. Для анализа использовались данные за две смены по пяти термопарам трех печей. Для примера на рис. 4 приведены графики изменения температур и частоты вращения ленточного транспортера печи № 2 со 150 до 270 минут от начала смены.

Из графиков видно, что при ступенчатом возмущении (кратковременном уменьшении частоты электропривода ленточного транспортера) наблюдается изменение температуры с транспортным запаздыванием в 20 мин.

Для получения значения постоянной времени из эксперимента при импульсном возмущении необходимо преобразовать рис. 4, построив изменение, например, температуры в точке 3 до ступенчатого возмущения (рис. 5).

Определенная из данного эксперимента (рис. 5) постоянная времени составила 70,8 минут. На основании пяти экспериментальных значений постоянной времени (разных печей и смен) определено среднее значение, равное 68,7 минут.

#### Моделирование переходных процессов в кипящем слое

Для определения структуры и настройки регуляторов температуры кипящего слоя необходимо уметь рассчитывать характеристики слоя как объекта регулирования.

Для описания свойств кипящего слоя как объекта регулирования рассмотрена [9, 10] сопряженная система уравнений теплового и материального баланса. При моделировании использованы следующие предпосылки.

1. Перестройка полей концентраций газовых компонентов, обусловленная изменением концентрации горючих в его объеме, происходит практически мгновенно по сравнению со скоростью изменения температуры слоя. Это позволяет рассчитывать концентрации газов в каждый момент времени из решения стационарных уравнений горения, что значительно упрощает задачу.

2. Интенсивное перемешивание частиц кипящего слоя практически обеспечивает равномерное распределение горючих по объему и изотермичность слоя.

3. Реагирование шихты с кислородом протекает со скоростью реакции, определенной экспериментально. Константа скорости окисления шихты рассчитывается по выражению [16–19]:

$$kS_{\text{ш}} = 433 \exp\left(-\frac{14560}{8,314T}\right), \text{ с}^{-1},$$

где  $k$  – константа скорости химического реагирования шихты, отнесенная к внешней поверхности частицы, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);  $S_{\text{ш}}$  – удельная внутренняя поверхность реагирования шихты, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>.

4. Теплота, выделяющаяся за счет сгорания шихты, затрачивается на её подогрев до температуры слоя, испарение влаги, теплоотвод к поверхностям теплообмена и на подогрев продуктов сгорания до температуры слоя.

Введем безразмерную концентрацию горючих в слое как отношение массы горючих в слое к массе самого слоя:

$$z = \frac{n\pi\delta^3\rho_{\text{ш}}}{6V\rho_{\text{с}}(1-\varepsilon)}.$$

Здесь  $z$  – безразмерная концентрация горючих в слое;  $n$  – количество горючих частиц в слое;  $\delta$  – диаметр горючих частиц, м;  $\rho_{\text{ш}}$ ,  $\rho_{\text{с}}$  – плотность частиц шихты и слоя (огарка) соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объем слоя, м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  – порозность слоя.

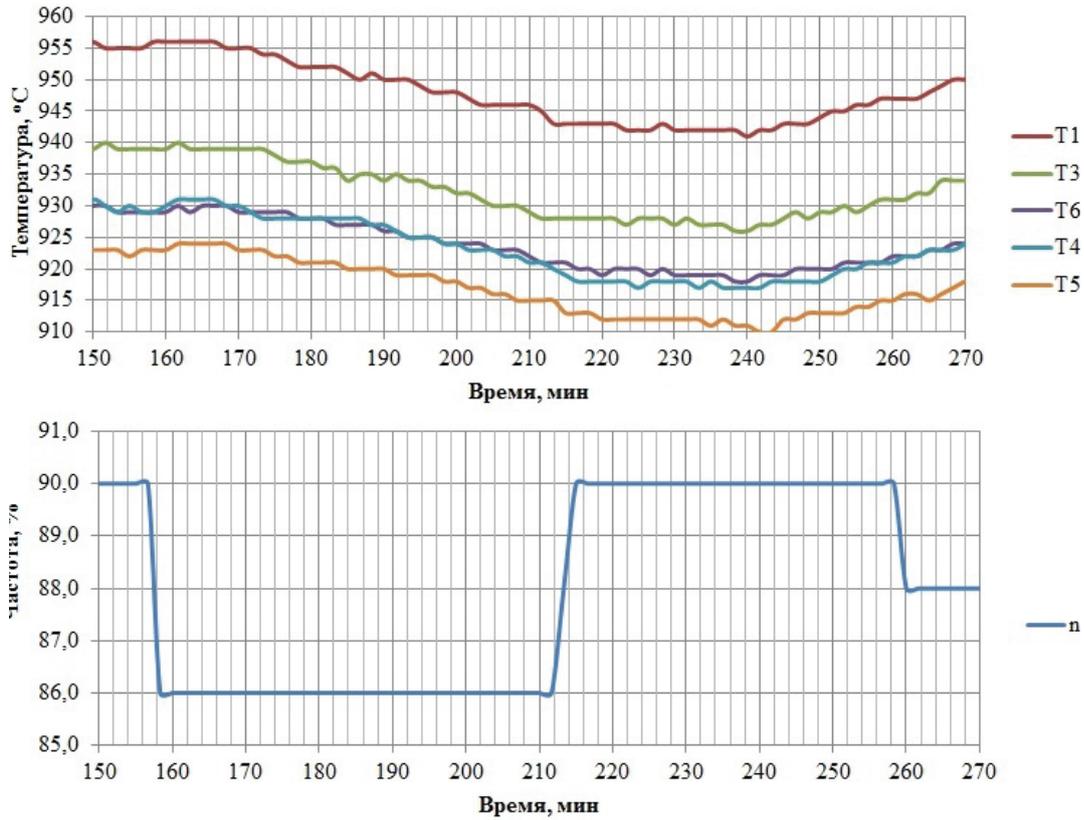


Рис. 4. Изменение температур в кипящем слое при изменении частоты вращения электропривода ленточного транспортера с течением времени

Fig. 4. Changing the bed temperatures with a change in the speed of the electric drive of the belt conveyor over time

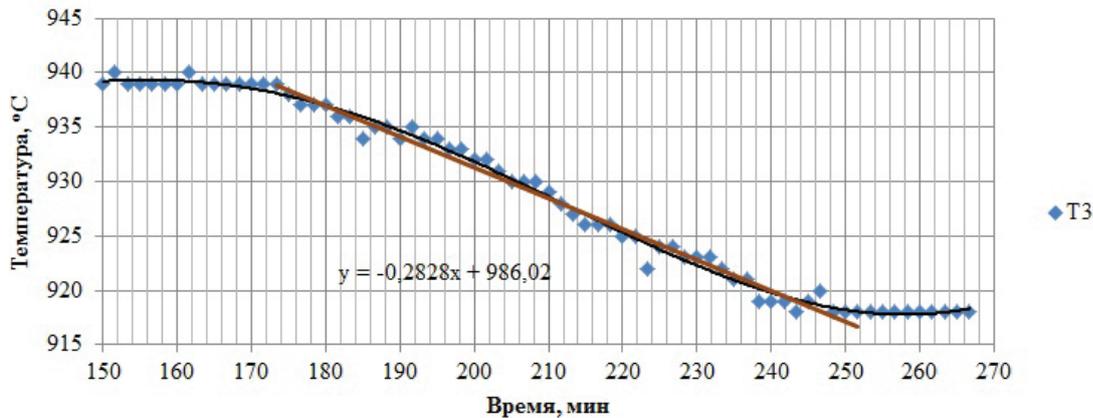


Рис. 5. Изменение температуры слоя T3 при ступенчатом изменении частоты электропривода ленточного транспортера

Fig. 5. Changing the bed temperature T3 with a step change in the frequency drive belt conveyor

Внешняя удельная (отнесенная к единице объема слоя) поверхность реагирования горючих частиц определяется соотношением:

$$S = \frac{n\pi\delta^2}{V} = \frac{6\rho_c(1-\varepsilon)}{\delta\rho_{ш}} z = \frac{6}{\delta}\sigma z, \text{ м}^2/\text{м}^3, \quad (1)$$

где  $\sigma = \frac{\rho_c(1-\varepsilon)}{\rho_{ш}}$ .

Удельный поток реагирующей шихты равен:

$$j = v_{ш}(kS_{ш}\zeta)SC_{O_2}, \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}). \quad (2)$$

Здесь  $\zeta = \frac{\delta}{6}$  – глубина проникновения реакции, м;  $v_{ш}$  – стехиометрический коэффициент реакции окисления цинкового концентрата (для шихты Челябинского цинкового завода  $v_{ш} = 1,91$

[16]);  $C_{O_2}$  – концентрация кислорода в дутье, кг/м<sup>3</sup>.

Подставляя (1) в (2) и вводя туда выражения для глубины проникновения реакции, получим выражение для удельного потока реагирующей шихты:

$$j = v_{\text{ш}}(kS_{\text{ш}}) \frac{\delta}{6} \frac{\rho_c(1-\varepsilon)}{\rho_{\text{ш}}} z C_{O_2} = \\ = v_{\text{ш}}(kS_{\text{ш}}) \sigma z C_{O_2} = j^* z, \quad \text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}),$$

где  $j^*$  – удельный поток реагирующей шихты, отнесенный к концентрации горючих веществ, равной 1, кг/(м<sup>3</sup>·с).

При указанных предположениях система нестационарных уравнений для описания переходного процесса в печи кипящего слоя будет иметь следующий вид:

$$Mc_c \frac{dt_c}{d\tau} = Vj^* z Q_{\text{н}}^{\text{п}} - B \left( 1 - \frac{W^{\delta}}{100} \right) c_{\text{ш}} (t_c - t_{\text{ш}}) - \\ - B \frac{W^{\delta}}{100} \chi - w F_c c_r (t_c - t_{\text{в}}) - k_{\text{н}} F_{\text{н}} (t_c - t_{\text{н}}), \quad (3)$$

$$V \rho_c (1-\varepsilon) \frac{dz}{d\tau} = B \left( 1 - \frac{W^{\delta}}{100} - \frac{A^{\delta}}{100} \right) - Vj^* z. \quad (4)$$

Здесь  $M$  – масса кипящего слоя, кг;  $c_c, c_{\text{ш}}$  – теплоемкость слоя и шихты соответственно, кДж/(кг·К);  $c_r$  – теплоемкость уходящих газов, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_c$  – температура слоя, °С;  $t_{\text{ш}}, t_{\text{в}}, t_{\text{н}}$  – начальная температура шихты, воздуха и поверхностей нагрева соответственно, °С;  $\tau$  – время, с;  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  – низшая рабочая теплота сгорания шихты, кДж/кг;  $B$  – расход шихты, кг/с;  $W^{\delta}$  – влажность шихты, %;  $\chi$  – теплота парообразования, кДж/кг;  $w$  – скорость воздушного дутья, м/с;  $F_c, F_{\text{н}}$  – площадь сечения точки и площадь поверхностей теплообмена соответственно, м<sup>2</sup>;  $k_{\text{н}}$  – коэффициент теплопередачи от слоя к поверхностям теплообмена, кВт/(м<sup>2</sup>·К);  $A^{\delta}$  – зольность шихты в рабочем состоянии, %.

Масса и объем кипящего слоя, входящие в уравнения (3) и (4), связаны с площадью поперечного сечения точки  $F_c$  и высотой кипящего слоя  $H$  очевидным соотношением:

$$M = HF_c(1-\varepsilon)\rho_c.$$

Упростим уравнения (3) и (4), чтобы получить выражение, позволяющее пусть грубо, но наглядно представить влияние основных параметров на переходный процесс. Горение частиц шихты и испарение влаги будем рассматривать как один процесс, характеризующий ее нижней теплотой сгорания. Пренебрежем теплотой, вносимой в топку воздухом, теплоносителем, поступающим в охлаждающие кессоны, и теплотой, затраченной на нагрев частиц, поступающих в слой. В этом случае уравнения преобразуются к виду:

$$Mc_c \frac{dt_c}{d\tau} = Vj^* z Q_{\text{н}}^{\text{п}} - w F_c c_r t_c - k_{\text{н}} F_{\text{н}} t_c, \quad (5)$$

$$M \frac{dz}{d\tau} = B - Vj^* z. \quad (6)$$

Выразив из уравнения (6) концентрацию горючих веществ в слое как

$$z = \frac{B}{Vj^*} - \frac{M}{Vj^*} \frac{dz}{d\tau}$$

и подставив ее в уравнение (5), получим уравнение теплового баланса в виде, удобном для качественного анализа:

$$Mc_c \frac{dt_c}{d\tau} = Q_{\text{н}}^{\text{п}} \left( B - M \frac{dz}{d\tau} \right) - w F_c c_r t_c - k_{\text{н}} F_{\text{н}} t_c, \quad (7)$$

Смысл уравнения (7) в следующем. В стационарном режиме  $\frac{dt_c}{d\tau} = \frac{dz}{d\tau} = 0$  вся теплота  $BQ_{\text{н}}^{\text{п}}$  затрачивается на нагрев продуктов сгорания и передается охлаждающим поверхностям. В переходных режимах (например, при уменьшении расхода топлива) сгорает не только поступающее топливо, но и часть горючих, аккумулированных в слое

(при этом  $\frac{dz}{d\tau} < 0$ ). При увеличении расхода топлива горючие, наоборот, накапливаются в слое ( $\frac{dz}{d\tau} > 0$ ), т. е. в слое сгорает меньше топлива, чем

его туда подается. Если производная  $\frac{dz}{d\tau}$  велика,

т. е. величина  $V \rho_c \frac{dz}{d\tau}$  сравнима с  $B$ , то влияние изменения концентрации горючих веществ в слое на изменение температуры слоя может быть существенным. Это происходит при достаточно высоких значениях  $z$ .

Для оценки постоянной времени кипящего слоя [8, 20, 21] продифференцируем уравнение (5) по времени:

$$Mc_c \frac{d^2 t_c}{d\tau^2} = Vj^* z Q_{\text{н}}^{\text{п}} \frac{dz}{d\tau} - (w F_c c_r + k_{\text{н}} F_{\text{н}}) \frac{dt_c}{d\tau}. \quad (8)$$

Считая поток  $j^*$  постоянным, выразим из уравнения (7) производную  $\frac{dz}{d\tau}$ :

$$\frac{dz}{d\tau} = \frac{1}{MQ_{\text{н}}^{\text{п}}} \left[ Q_{\text{н}}^{\text{п}} B - Mc_c \frac{dt_c}{d\tau} - (w F_c c_r + k_{\text{н}} F_{\text{н}}) dt_c \right].$$

Подставив ее в (8), получим уравнение второго порядка для изменения температуры кипящего слоя в виде:

$$\frac{Mc_c \rho_c (1-\varepsilon)}{j^*} \frac{d^2 t_c}{d\tau^2} + \\ + \left[ Mc_c + \frac{\rho_c (1-\varepsilon)}{j^*} (w F_c c_r + k_{\text{н}} F_{\text{н}}) \right] \frac{dt_c}{d\tau} = \\ = Q_{\text{н}}^{\text{п}} B - (w F_c c_r + k_{\text{н}} F_{\text{н}}) t_c. \quad (9)$$

При ступенчатом изменении расхода топлива в момент времени  $\tau=0$  с  $B_0$  до  $B$  температура возра-

стает за продолжительный отрезок времени с  $t_0$  до  $t_c$ . Учитывая, что до внесения возмущения в стационарном состоянии наблюдалось равенство тепловыделений и теплоотода

$$Q_n^p B_0 - (wF_c c_a + k_n F_n) t_0 = 0, \quad (10)$$

вычтем уравнение (10) из (9) и, введя традиционно используемые обозначения при описании свойств объектов автоматического регулирования  $B - B_0 = x$  и  $t_c - t_0 = y$ , получим уравнение многоемкостного статического объекта [8] (кипящего слоя) в виде:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 y}{d\tau^2} + (T_1 + T_2) \frac{dy}{d\tau} + y = K_y x. \quad (11)$$

В случае монотонного изменения параметров можно, пренебрегая второй производной по времени уравнения (11), представить кипящий слой как одноемкостный статический объект:

$$(T_1 + T_2) \frac{dy}{d\tau} + y = K_y x,$$

в котором постоянная времени включает в себя два характерных слагаемых:

$$T_1 = \frac{Mc_c}{wF_c c_r + k_n F_n} = \frac{H(1-\varepsilon)\rho_c c_c}{w c_r + k_n F_n / F_c}, \quad (12)$$

$$T_2 = \frac{\rho_c(1-\varepsilon)}{j^*} = \frac{\rho_c(1-\varepsilon)}{v_m(kS_m)C_{O_2}} \frac{\rho_m}{\rho_c(1-\varepsilon)} = \frac{\rho_m}{v_m(kS_m)C_{O_2}}. \quad (13)$$

Первая составляющая постоянной времени (12) характеризует соотношение между затратами теплоты на нагрев слоя, с одной стороны, и на нагрев продуктов сгорания и теплоносителя в трубах с другой. Расчет второй составляющей постоянной времени по соотношению (13) затруднен хотя бы из-за того, что, как правило, удельная поверхность частиц в слое либо средний диаметр частиц и удельный поток выгорающего вещества с достаточной точностью не известны. Используя соотношение между расходом топлива и концентрацией горючих веществ в слое для начального стационарного состояния  $B_0 = Vj^* z_0$ , можно записать:

$$T_2 = \frac{\rho_c(1-\varepsilon)}{j^*} = \frac{V\rho_c(1-\varepsilon)}{B_0} z_0 = \frac{Mz_0}{B_0}.$$

Используя данное выражение, вторую составляющую постоянной времени  $T_2$  можно легко определить из эксперимента.

Таким образом, на инерционность кипящего слоя основное влияние оказывают его высота, условия выгорания (коэффициент избытка воздуха, скорость дутья) и концентрация горючих в слое, зависящая от кинетических характеристик реагирования шихты. Оценочные расчеты для обжиговой печи № 2 Челябинского цинкового завода дают следующие значения для постоянных времени. Так,  $T_1 = 65$  минут,  $T_2 = 3,5$  минуты, тогда

суммарная постоянная времени составляет 68,5 минут. Таким образом, основная инерция заключается в чрезвычайно большой массе слоя (более 100 тонн материала). И если концентрация горючих меняется сравнительно быстро (в течение 15 минут) (рис. 6, а), то температура слоя при изменении расхода шихты выходит на новое стационарное состояние чрезвычайно медленно, в течение 3,5 часов (рис. 6, б).

На рис. 7 приведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных на отрезке времени со 170 по 210 минуту от начала смены.

Величина коэффициента усиления может быть рассчитана как

$$K_y = \frac{Q_n^p}{wF_c c_r + k_n F_n}, \quad (\text{Кс}) / \text{кг}.$$

В физическом смысле коэффициент усиления представляет собой изменение температуры слоя при изменении расхода шихты на 1 кг/с.

Для решения системы уравнений (5) и (6) примем начальные условия:

Начальные условия:

$$\tau = 0, \quad z_0 = \frac{B_0}{Vj^*}, \quad t_0 = \frac{Q_n^p B_0}{wF_c c_r + k_n F_n}.$$

Приведем уравнения к безразмерному виду,

для этого введем безразмерную температуру  $\vartheta = \frac{t_c}{t_0}$

и безразмерное время  $\xi = \frac{B\tau}{V\rho_c(1-\varepsilon)} = \frac{B\tau}{M}$ . Тогда

система уравнений будет иметь следующий вид:

$$\sigma \frac{d\vartheta}{d\xi} = z - \psi\vartheta,$$

$$\frac{dz}{d\xi} = 1 - \varphi z.$$

Здесь:

$$\varphi = \frac{Vj^*}{B}, \quad \sigma = \frac{Bc_c t_0}{Vj^* Q_n^p}, \quad \psi = \frac{(wF_c c_r + k_n F_n) t_0}{Vj^* Q_n^p}.$$

Начальные условия:

$$\xi = 0, \quad z_0 = \frac{1}{\varphi} = \frac{B_0}{Vj^*}, \quad \vartheta_0 = \frac{1}{\varphi\psi} = \frac{Q_n^p B_0}{(wF_c c_r + k_n F_n) t_0}.$$

Решение системы уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \vartheta &= \left( \vartheta_0 + \frac{z_0 - \sigma / \psi}{\sigma\varphi - \psi} \right) \exp\left(-\frac{\psi}{\sigma} \xi\right) + \\ &+ \frac{\sigma / \psi - 1 / \varphi}{\sigma\varphi - \psi} + \frac{1 / \varphi - z_0}{\sigma\varphi - \psi} \exp(-\varphi\xi), \\ z &= \left( z_0 - \frac{1}{\varphi} \right) \exp(-\varphi\xi) + \frac{1}{\varphi}. \end{aligned}$$

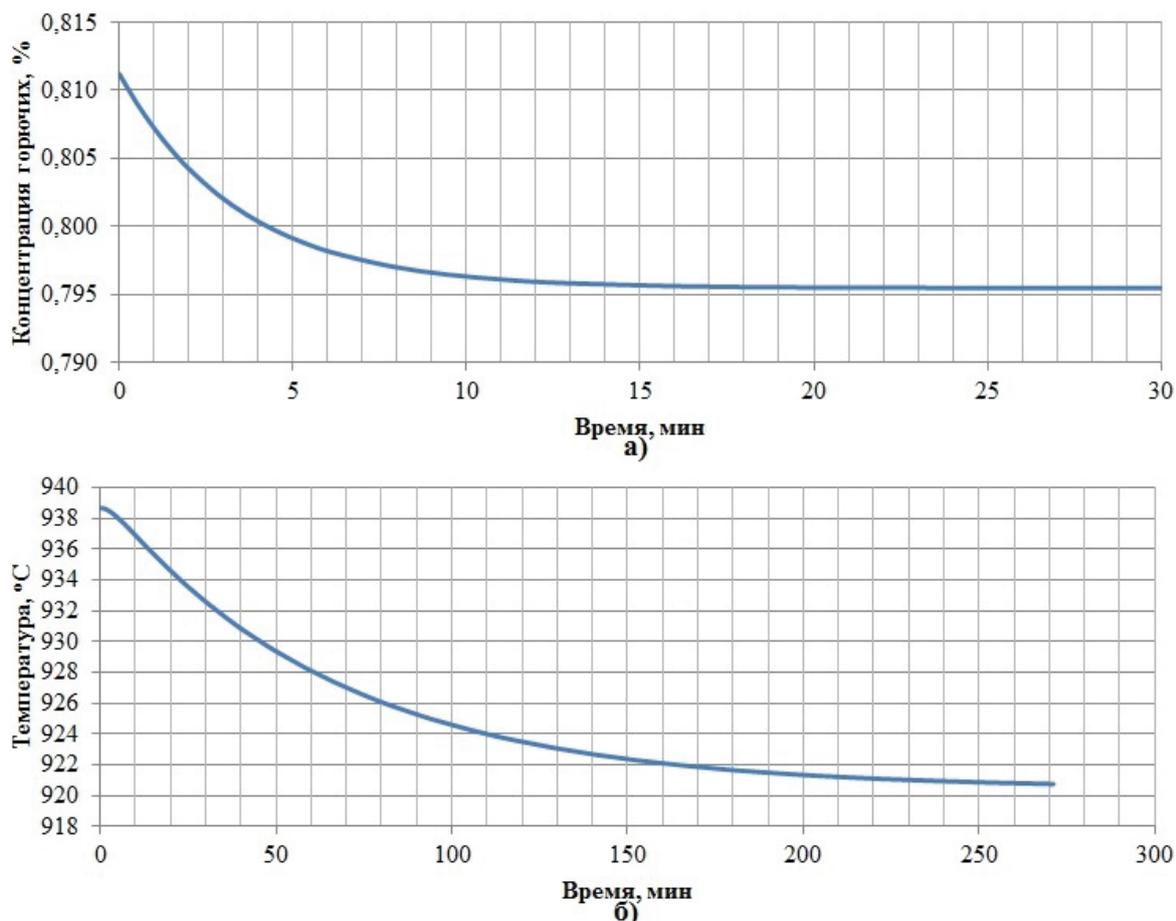


Рис. 6. а) изменение концентрации горючих с течением времени; б) изменение температуры слоя с течением времени

Fig. 6. a) changing the combustible concentration over time; b) changing the bed temperature over time

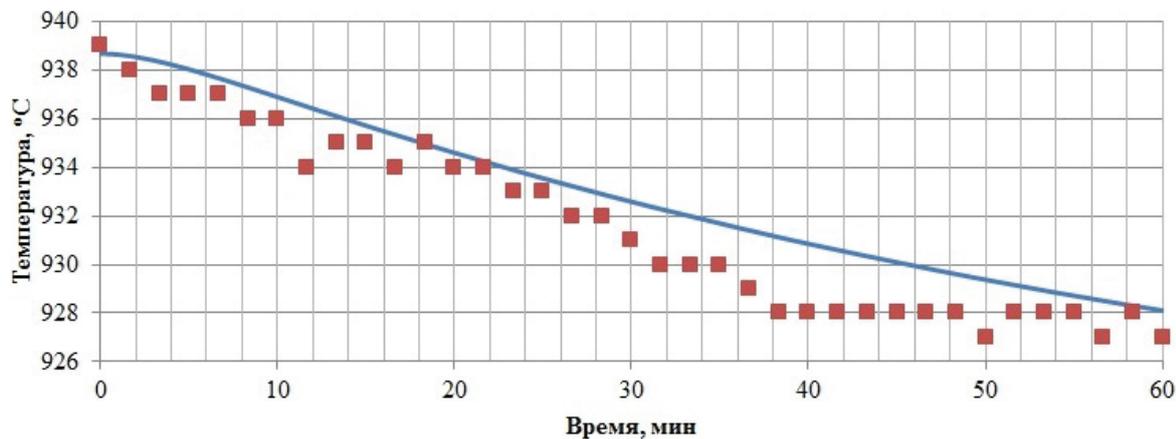


Рис. 7. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по изменению температуры слоя с течением времени при ступенчатом изменении расхода шихты: линия – расчет, точки – эксперимент

Fig. 7. Comparison of the calculated and experimental data on the bed temperature change over time with a step change in the charge rate: line – calculation, points – experiment

#### Регулятор температуры кипящего слоя

Регулятор предназначен для поддержания заданной температуры в печи кипящего слоя путем изменения частоты вращения ленточного транспортера.

Регулятор должен поддерживать на заданном уровне максимальную из температур кипящего слоя, приведенных на рис. 3. У оператора должна быть возможность выводить из расчета максимальной температуры любой из датчиков в случае,

если их показания некорректны. При недостоверности показаний датчика его значение должно выводиться из расчета максимальной температуры автоматически.

Для определения оптимальных настроек регулятора на основании расчетных и экспериментальных данных создана приближенная модель печи кипящего слоя в ПТК «Овация» и разработан алгоритм регулирующего контура для поддержания температуры кипящего слоя на заданном значении, в основе которого лежит стандартный ПИ-регулятор [20, 21]. Структурная схема регулирующего контура приведена на рис. 8.

Модель кипящего слоя представляет собой последовательность типовых логических звеньев: звено ограничения скорости изменения частоты вращения ленточного транспортера (1 % в минуту); звено транспортного запаздывания (20 мин); апериодическое звено, отвечающее за динамические характеристики объекта (постоянная времени  $T=68,7$  мин); звено нелинейности, преобразующее процент частоты вращения ленточного транспортера в градусы температуры кипящего слоя. На рис. 9 представлены графики задающих воздействий регулирующего контура и переходный процесс в модели кипящего слоя.

До 11:00:00 система находилась в стационарном состоянии при температуре 940 °С с частотой

вращения электропривода ленточного транспортера 87 %. В 11:00:00 нанесено ступенчатое возмущение регулятору изменением задания температуры на 920 °С. Регулятор в первый момент времени ступенчато изменяет задание по частоте вращения транспортера до 77 % (величина изменения определяется величиной пропорциональной составляющей), постепенно продолжая снижать ее до момента начала изменения температуры (интегральная составляющая) (11:20:00). По истечении времени транспортного запаздывания (при появлении реакции регулируемого параметра на изменение частоты вращения) регулятор постепенно снимает возмущение (увеличивает частоту вращения) до выхода температуры на заданное значение (11:55:00). После этого происходит временный выход регулируемого значения температуры за заданное значение в пределах 2,5 °С (перерегулирование) и постепенный выход ее на стационарное значение. Выход температуры на заданное значение происходит в течение 55 минут с момента внесения возмущения в систему.

Настройки регулятора (коэффициент усиления  $K_n=5$ , постоянная времени интегрирования  $T_n=1200$  с) подобраны эмпирическим путем в созданной модели, исходя из следующих соображений [22]:

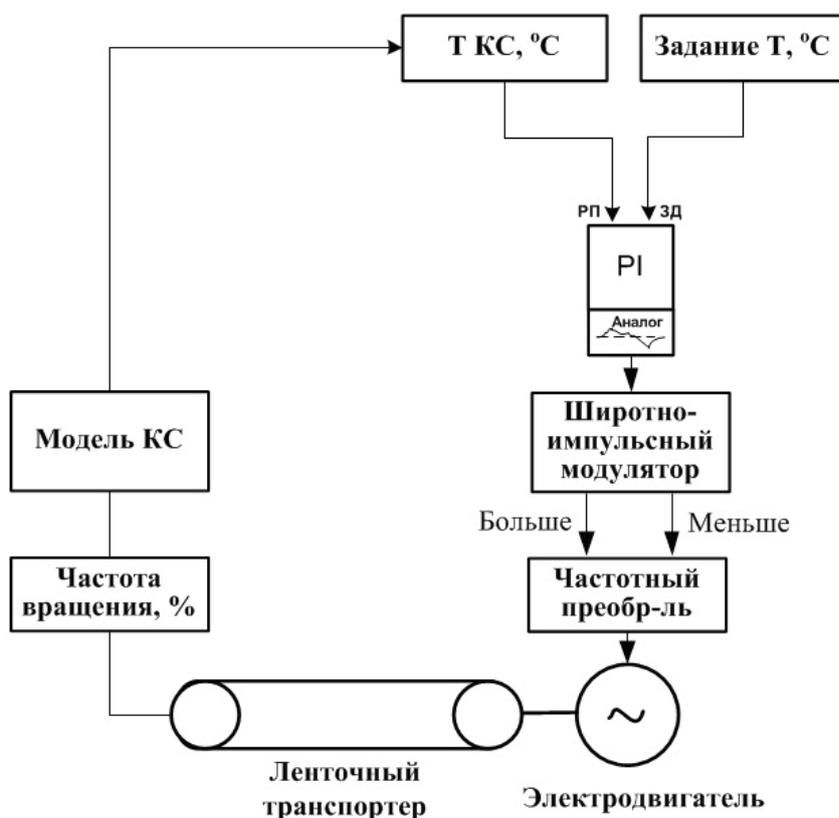


Рис. 8. Структурная схема регулятора температуры кипящего слоя

Fig. 8. Structural scheme of the fluidized bed temperature regulator

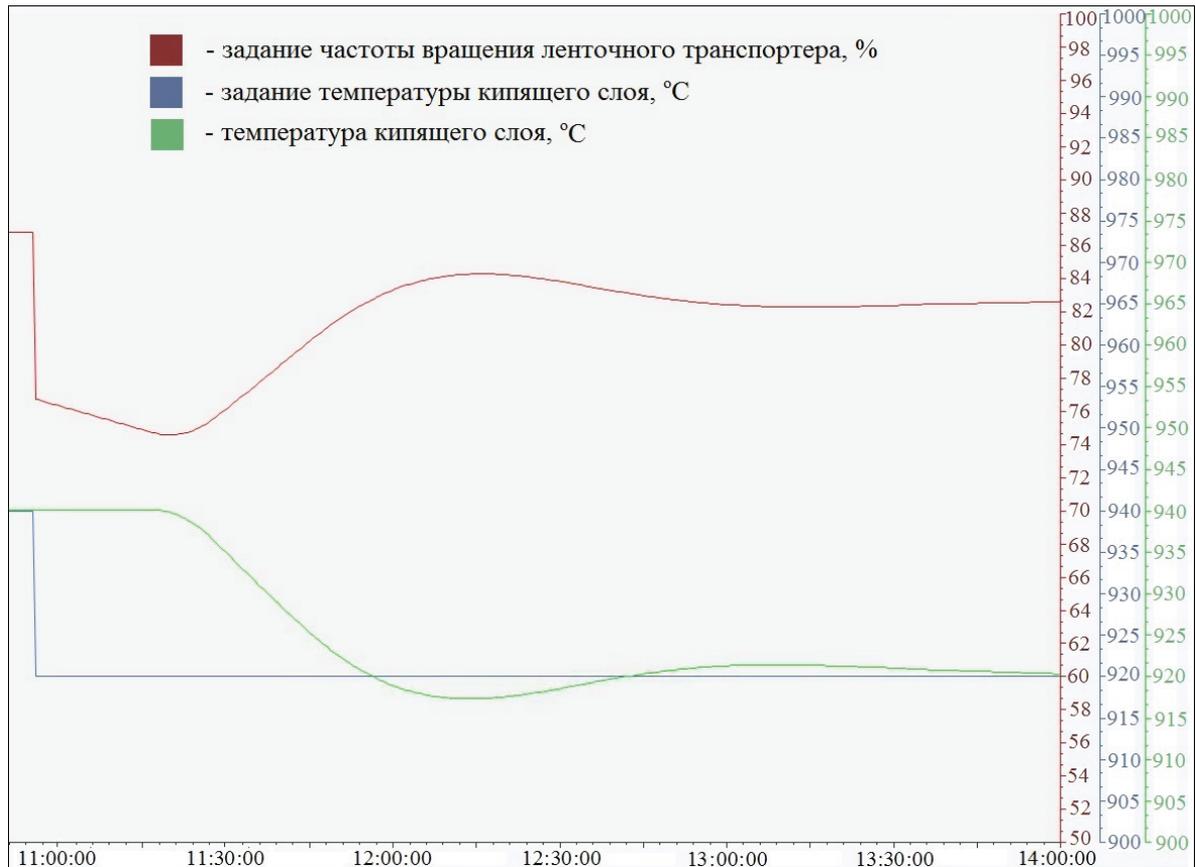


Рис. 9. Графики задающих воздействий регулирующего контура и переходный процесс в модели кипящего слоя

Fig. 9. Graphs of control actions of the control loop and the transient process in the fluidized bed model

- 1) увеличение пропорционального коэффициента ( $K_p$ ) увеличивает быстродействие регулятора, но снижает запас устойчивости;
- 2) увеличение постоянной времени интегрирования ( $T_i$ ) увеличивает запас устойчивости, но ошибка регулирования с течением времени уменьшается медленнее (выход на стационарное значение за более длительное время).

#### Заключение

Разработана математическая модель переходных процессов в печи кипящего слоя для обжига цинковых концентратов, позволяющая рассчитать изменение температуры слоя и концентрации го-

рючих веществ в нем при изменении расхода загружаемой в печь шихты. Сопоставление расчетов с экспериментальными данными показали хорошую сходимость результатов.

На основании полученных данных создана приближенная модель печи кипящего слоя в ПТК «Овация» и разработан алгоритм регулятора температуры кипящего слоя.

Внедрение на ПАО «ЧЦЗ» регулятора температуры позволит без участия оператора поддерживать заданную температуру кипящего слоя, постоянство горючих в слое, исключить недожог шихты и снизить опасность шлакования слоя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Процессы и аппараты цветной металлургии / С.С. Набойченко, Н.Г. Агеев, С.В. Карелов и др. / под общ. ред. С.С. Набойченко. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – 564 с.
2. Марченко Н.В., Вершинина Е.П., Гильденбрандт Э.М. Металлургия тяжелых цветных металлов. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 394 с.
3. Benlyamani M., Ajersch F. Agglomeration of particles during roasting of zinc sulfide concentrates // Metallurgical Transactions B. – 1986. – V. 17. – P. 647–656. DOI: 10.1007/BF02657127
4. Roasting of a sulfide polymetallic concentrate in a fluidized bed furnace / Y.A. Savinova, V.A. Popov, A.B. Portov, L.S. Tsemekhman // Russian Metallurgy (Metally). – 2014. – V. 2014. – P. 351–357. DOI: 10.1134/S0036029514050115
5. Jarosz P., Malecki S. Kinetics of the fluidised oxidation of zinc sulphide concentrates with an addition of inert materials // Archives of metallurgy and materials. – 2014. – V. 59. – P. 1367–1372.
6. Natesan K., Philbrook W.O. Oxidation kinetic studies of zinc sulfide in a fluidized bed reactor // Metallurgical and Materials Transactions. – 1970. – V. 1. – P. 1353–1360. DOI: 10.1007/BF02900254
7. Oxidation of zinc sulfide in a fluidized bed / Y. Fukunaka, T. Monta, Z. Asaki, Y. Kondo // Metallurgical Transactions B. – 1976. – V. 7. – P. 307–314.

8. Плетнев Г.П. Автоматическое регулирование и защита теплоэнергетических установок. 2-е изд., перераб. и доп. – М., Энергия, 1976. – 424 с.
9. Мунц В.А., Филипповский Н.Ф., Баскаков А.П. Топка с кипящим слоем как объект регулирования // Теплоэнергетика. – 1998. – № 6. – С. 15–19.
10. Control of thermal processes in a fluidised bed combustor (FBC) / V.A. Munts, N.F. Filippovskij, A.P. Baskakov, E.Yu. Pavliok, Bo. Leckner // Proc. of 14<sup>th</sup> International Conference on FBC. – Vancouver, May 1997. – V. 2. – P. 857–862.
11. Characterization of moisture distribution in a fluidized bed / M. Farkhondehkhavaki, M. Soleimani, M. Latifi, F. Berruti, C. Briens, J. McMillan // Measurement. – 2014. – V. 47. – P. 150–160.
12. Embedded Optimization Methods for Industrial Automatic Control / H.J. Ferreau, S. Almér, R. Verschueren, M. Diehl, D. Frick, A. Domahidi, J.L. Jerez, G. Stathopoulos, C. Jones // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – V. 50. – P. 13194–13209.
13. Geldart D. Condition and control of fluid-bed process // Powder Technology. – 1973. – № 7. – P. 285–292.
14. Ротац В.Я. Теория автоматического управления. 5-е изд., перераб. и доп. – М.: ИД МЭИ, 2008. – 396 с.
15. Бесекинский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
16. Мунц В.А., Ивакина С.А., Чойнзонов Д.Б. Изучение кинетики окисления сульфидного цинкового концентрата в печи кипящего слоя // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17. – № 3. – С. 34–42. DOI: 10.14529/power170304
17. Мунц В.А., Ивакина С.А., Терентьев В.М. Газообразование при обжиге цинкового концентрата в кипящем слое // Цветные металлы. – 2017. – № 2. – С. 40–45. DOI: 10.17580/tsm.2017.02.06
18. Паньшин А.М., Козлов П.А., Терентьев В.М. Кинетика окисления сульфидных цинковых концентратов // Цветные металлы. – 2014. – № 2. – С. 34–37.
19. Sofekun O.A., Doraiswamy L.K. High-temperature oxidation of zinc sulfide: Kinetic modeling under conditions of strict kinetic control // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 1996. – V. 35. – P. 3163–3170.
20. Исмагходжаева С.К., Кузицин В.Ф. Повышение эффективности АСР тепловой нагрузки паровых котлов при сжигании топлива нескольких видов // Теплоэнергетика. – 2017. – № 5. – С. 82–94. DOI: 10.1134/S0040363617050034
21. Кузицин В.Ф., Мерзликина Е.И., Ван Ва Хоанг. ПИД-регулятор с предиктором и алгоритмом автоматической настройки: исследование эффективности для тепловых объектов // Теплоэнергетика. – 2017. – № 9. – С. 80–90. DOI: 10.1134/S0040363617090053
22. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования. Справочное пособие. 2-е изд. перераб. и доп. / А.С. Клюев, А.Т. Лебедев, С.А. Клюев, А.Г. Товарнов / под ред. А.С. Клюева. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.

*Поступила 10.11.2017 г.*

#### **Информация об авторах**

**Ивакина С.А.**, аспирант кафедры теплоэнергетики и теплотехники Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

**Мунц В.А.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетики и теплотехники Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина.

UDC 66.096.5

## FLUIDIZED BED FURNACE FOR ROASTING ZINC CONCENTRATES AS A CONTROL OBJECT

Svetlana A. Ivakina<sup>1</sup>,  
svetlana-ivakina@mail.ru

Vladimir A. Munts<sup>1</sup>,  
v.a.munts@urfu.ru

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
19, Mira street, Ekaterinburg, 620002, Russia.

**The relevance** of the research is caused by continuous increase in using zinc in the world. Obtaining of zinc is an expensive process, one of the stages of which is roasting of sulfide zinc concentrates (charge) in a fluidized bed furnace using air blast enriched with oxygen. Since the granulometric composition of the charge, its moisture content and composition are variable, the temperature of the fluidized bed can vary and requires continuous monitoring by the operator. A huge mass of material determines the large bed inertia, therefore, it is necessary to use an automatic control system.

**The main aim** of the research is to optimize the operation of the fluidized bed furnace for roasting sulphide zinc concentrates, in particular, to introduce automatic control of the fluidized bed temperature in order to avoid temperature fluctuations over a wide range. A significant decrease of the bed temperature leads to degradation of the concentrate roasting, as a consequence, the yield of the final product (zinc) decreases. As the temperature rises, the danger of bed slagging increases substantially due to the possible local overheating. To do this, it is necessary to obtain the dependence of the bed temperature on the charge rate, both by calculation and experimentally, on the basis of the studied kinetics of zinc concentrate oxidation in the fluidized bed furnace.

**Object** of research is the fluidized bed furnace of the Chelyabinsk Zinc Plant for roasting sulphide zinc concentrate.

**Methods:** obtaining the calculated dependence of the fluidized bed temperature on the charge rate based on the studied kinetics of zinc concentrate oxidation; an experimental study of the dynamics of the change in the bed temperature with a change in the charge rate.

**Results.** The authors have developed the mathematical model of the transient processes in the fluidized bed furnace for calcining zinc concentrates, which makes it possible to calculate the change in the bed temperature and the combustible substances concentration in it with a change in the charge rate. Comparison of the calculations with the experimental data showed good convergence of the results. On the basis of the obtained data, an approximate model of the fluidized bed furnace in the Ovatsiya PTA and an algorithm of the fluidized bed temperature regulator were developed. The introduction of a temperature regulator at the Chelyabinsk Zinc Plant will enable automatically maintain the specified fluidized bed temperature, the constancy of the combustible in the bed, eliminate undesirable charges, and reduce the danger of slagging the layer.

### Key words:

Zinc concentrate, fluidized bed, automatic control, time constant, reaction velocity constant.

### REFERENCES

- Naboychenko S.S., Ageev N.G., Karelov S.V., Mamyachenkov C.V., Sergeev V.A. *Protsessy i apparaty tsvetnoy metallurgii* [Processes and Apparatuses of Non-Ferrous Metallurgy]. Ed. by S.S. Naboychenko. Ekaterinburg, Ural University Publ., 2013. 564 p.
- Marchenko N.V., Vershinina E.P., Gildenbrandt E.M. *Metallurgiya tyazhelykh tsvetnykh metallov* [Metallurgy of Heavy Non-Ferrous Metals]. Krasnoyarsk, IPK SFU Publ., 2009. 394 p.
- Benlyamani M., Ajersch F. Agglomeration of particles during roasting of zinc sulfide concentrates. *Metallurgical Transactions B*, 1986, vol. 17, pp. 647–656. DOI: 10.1007/BF02657127
- Savinova Y.A., Popov V.A., Portov A.B., Tsemekhman L.S. Roasting of a Sulfide Polymetallic Concentrate in a Fluidized Bed Furnace. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2014, vol. 2014, pp. 351–357. DOI: 10.1134/S0036029514050115
- Jarosz P., Malecki S. Kinetics of the fluidized oxidation of zinc sulphide concentrates with an addition of inert materials. *Archives of metallurgy and materials*, 2014, vol. 59, pp. 1367–1372.
- Natesan K., Philbrook W.O. Oxidation kinetic studies of zinc sulfide in a fluidized bed reactor. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1970, vol. 1, pp. 1353–1360. DOI: 10.1007/BF02900254
- Fukunaka Y., Monta T., Asaki Z., Kondo Y. Oxidation of zinc sulfide in a fluidized bed. *Metallurgical Transactions B*, 1976, vol. 7, pp. 307–314.
- Pletnev G.P. *Avtomaticheskoe regulirovanie i zashchita teploenergeticheskikh ustanovok*. [Automatic control and protection of thermal power plants]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 424 p.
- Munts V.A., Filippovskii N.F., Baskakov A.P. Topka s kipyashchim sloem kak obekt regulirovaniya [The fluidized bed combustion as control object]. *Teploenergetika*, 1998, no. 6, pp. 15–19.
- Munts V.A., Filippovskij N.F., Baskakov A.P., Pavliok E.Yu., Leckner Bo. Control of thermal processes in a fluidised bed combustor (FBC). *Proc. of 14<sup>th</sup> International Conference on FBC*. Vancouver May 1997. Vol. 2, pp. 857–862.
- Farkhondehkavaki M., Soleimani M., Latifi M., Berruti F., Briens C., McMillan J. Characterization of moisture distribution in a fluidized bed. *Measurement*, 2014, vol. 47, pp. 150–160.
- Ferreau H.J., Almér S., Verschueren R., Diehl M., Frick D., Domahidi A., Jerez J.L., Stathopoulos G., Jones C. Embedded Optimization Methods for Industrial Automatic Control. *IFAC-Papers-OnLine*, 2017, vol. 50, pp. 13194–13209.
- Geldart D. Condition and control of fluid-bed process. *Powder Technology*, 1973, no. 7, pp. 285–292.
- Rotach V.Ya. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control]. Moscow, MEI Publ. house, 2008. 396 p.
- Besekerskii V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [The theory of automatic control systems]. St. Petersburg, Professiya Publ., 2003. 752 p.
- Munts V.A., Ivakina S.A., Choyznov D.B. Study of Sulphide Zinc Concentrates Oxidation Kinetics in the Fluidized Bed Furnace. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 34–42. In Rus. DOI: 10.14529/power170304

17. Munts V.A., Ivakina S.A., Terentev V.M. Gas Generation during Zinc Concentrate Annealing. *Tsvetnye Metally*, 2017, no. 2, pp. 40–45. In Rus. DOI: 10.17580/tsm.2017.02.06
18. Panshin A.M., Kozlov P.A., Terentev V.M. Kinetics of Oxidation of Sulfide Zinc Concentrates. *Tsvetnye Metally*, 2014, no. 2, pp. 34–37. In Rus.
19. Sofekun O.A., Doraiswamy L.K. High-temperature oxidation of zinc sulfide: Kinetic modeling under conditions of strict kinetic control. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 1996, vol. 35, pp. 3163–3170.
20. Ismatkhodzhaeva S.K., Kuzishchin V.F. [Increase of the ACS efficiency of the thermal load of steam boilers during the combustion of several types of fuel]. *Teploenergetika*, 2017, no. 5, pp. 82–94. In Rus. DOI: 10.1134/S0040363617050034
21. Kuzishchin V.F., Merzlikina E.I., Van Va Khoang PID controller with predictor and automatic tuning algorithm: efficiency study for thermal objects]. *Teploenergetika*, 2017, no. 9, pp. 80–90. In Rus. DOI: 10.1134/S0040363617090053
22. Klyuev A.S., Lebedev A.T., Klyuev S.A., Tovarnov A.G. *Naladka sredstv avtomatizatsii i avtomaticheskikh sistem regulirovaniya. Spravochnoe posobie* [Adjustment of automation and automatic control systems. Tutorial]. Ed. by A.S. Klyuev. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 368 p.

Received: 10 November 2017.

#### Information about the authors

**Svetlana A. Ivakina**, postgraduate, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.  
**Vladimir A. Munts**, Dr. Sc., professor, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

УДК 528.44:528.9

## ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ДЛЯ УЧЕТА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПРИ ВЕДЕНИИ ЕДИНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО РЕЕСТРА НЕДВИЖИМОСТИ

Трубина Людмила Константиновна<sup>1</sup>,  
trubinalk@rambler.ru

Аврунев Евгений Ильич<sup>1</sup>,  
kadastr204@yandex.ru

Николаева Ольга Николаевна<sup>1</sup>,  
onixx76@mail.ru

Каленицкий Анатолий Иванович<sup>1</sup>,  
kaf.astronomy@ssga.ru

Антипов Илья Тимофеевич<sup>1</sup>,  
kaf.astronomy@ssga.ru

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
Россия, 630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10.

**Актуальность.** В связи с проводящейся в России реформой системы Государственного кадастра недвижимости необходимо совершенствование организации кадастровой деятельности для повышения объективности и достоверности информации о земельных участках и оптимизации использования земель. Одним из актуальных направлений является учет экологической составляющей при ведении кадастровой деятельности на урбанизированных территориях, характеризующихся высоким уровнем загрязнения окружающей среды. В настоящее время официально утвержденная методика такого учета отсутствует, а подходы, предлагаемые различными авторами, в большинстве своем основаны на регистрации и оценке существующих уровней загрязнения основных природных компонентов окружающей среды. При этом экологическая обстановка города не рассматривается как целостная динамическая система, и не принимаются во внимание ее изменения во времени и пространстве. Для системного рассмотрения экологической обстановки городских территорий необходим комплексный анализ влияния источников загрязнения и процессов распространения загрязняющих веществ, определяемых природными условиями территории и особенностями городской инфраструктуры.

**Цель работы:** обоснование подхода к учету экологической составляющей при кадастровой оценке территорий путем геоинформационного анализа и трехмерного картографического моделирования процессов распространения загрязняющих веществ в городской среде.

**Методы:** геоинформационный анализ, картографическое моделирование, методы картографической визуализации данных, 3D-моделирование геопространственных данных.

**Результаты.** Предложен подход к экологической оценке состояния урбанизированной территории, основанный на анализе и изучении потоков переноса загрязняющих веществ. Обоснована логическая последовательность интеграции разнородных экологических данных при моделировании потоков переноса вещества. Построена цифровая модель рельефа и цифровая модель местности г. Новосибирска. Сформирована база экологических данных на территорию города. Выполнено экологическое зонирование территории г. Новосибирска по комплексному показателю степени опасности. Выполнено 3D-моделирование потоков переноса загрязняющих веществ от техногенных объектов экологической опасности.

**Выводы.** Предложенный подход обеспечивает динамическое рассмотрение экологической ситуации на территории города как результата взаимодействия природных и городских потоковых систем. Этим обеспечивается детальность и объективность оценки экологической обстановки в пределах конкретных кадастровых кварталов, что закладывает основу для внесения результатов экологической оценки в перечень собираемых кадастровых сведений.

### Ключевые слова:

Потоковые системы, экологическая обстановка, экологическая оценка, геоинформационный анализ, цифровые модели рельефа, картографическое моделирование, 3D-моделирование, кадастровая деятельность.

### Постановка проблемы

Специфика каждого города, обусловленная характерными для него природными условиями, структурой застройки и техногенными источниками, определяет особенности экологической обстановки и существующих экологических проблем. Необходимость учета экологического состояния территории при кадастровой оценке земель была заявлена в «Методике государственной кадастро-

вой оценки городских земель» (1999 г.) [1]. Включение блока экологической информации в Государственный кадастр недвижимости значительно расширило бы его возможности как многоцелевой системы, позволяющей органам государственной власти принимать рациональные управленческие решения, разрабатывать эффективные рекреационные мероприятия и оказывать адресную социальную и медицинскую поддержку населения,

проживающего в наиболее неблагоприятных экологических условиях [2–4].

Для оценки экологического состояния городских земель применяется совокупность показателей, дифференцированных по функциональному назначению земель и регламентируемых большим числом нормативно-методических документов. Их анализ, приведенный в работе [5], показывает, что для каждой категории земель применяется своя пространственно-временная классификация, рассматриваемая автономно, хотя экологический подход указывает на необходимость установления взаимосвязей между природными факторами (рельеф, климат и т. д.) и техногенной деятельностью человека.

На практике методики оценки экологического состояния территории базируются на анализе ряда количественных показателей, в частности, концентрации загрязняющих вредных веществ в воздухе, воде и почве, объемов вредных веществ, поступающих в атмосферу от источников и др. Уровень загрязнения отдельных компонентов природной среды рассматривается изолированно, не учитывается эмиссия отдельных загрязняющих веществ. Наличие межведомственной разобщенности при сборе данных об одном объекте приводит к получению интегрированных показателей, не всегда объективно отражающих существующую экологическую ситуацию [6, 7]. Также следует отметить разнородность используемых схем наблюдения и топографических основ, используемых для локализации пространственных данных [8], что затрудняет сопоставимость результатов экологической оценки, выполненной по одной и той же методике, но для различных объектов или территорий.

В целом определенные ограничения как по составу исходных данных, так и по использованию методов их обобщения и анализа при дискретности и неоднородности покрытия территории данными о концентрации загрязняющих веществ могут приводить к некорректности отображения территориального распределения того или иного показателя, чаще всего осуществляемого методами интерполяции и экстраполяции. Таким образом, интегральные показатели, получаемые в результате преобразования первичных данных, измеренных в дискретных точках пространства, позволяют оценивать общую экологическую ситуацию на уровне города, но при этом недостаточно детально отражают ситуацию конкретного земельного участка или кадастрового квартала.

Все перечисленные данные являются пространственно-распределенными, поэтому для их интерпретации и последующего анализа предполагается использование методов и приемов картографического 3D-моделирования средствами геоинформационных систем, обладающих развитым инструментарием по цифровому моделированию рельефа, анализу и визуализации картографических 3D-моделей.

Из всего многообразия природных условий наиболее характерное и определяющее влияние на формирование экологической обстановки оказывает рельеф. Он обеспечивает определенный тип взаимодействия объектов природной и антропогенной среды и таким образом влияет на перемещение вещества и энергии. Ход большинства эколого-геохимических процессов зависит от поступления в каждую точку территории влаги и солнечного тепла, их распределение регулируется углами наклона и экспозицией склонов. Направление и распространение загрязнений, пути миграции вещества, зоны его возможного накопления и смыва определяют типы морфоэлементов рельефа. Получение перечисленных характеристик обеспечивает детальный морфометрический анализ рельефа, результаты которого позволяют выполнить предварительное зонирование территории по направленности и интенсивности потоков вещества, в том числе загрязняющих веществ. Сочетание транспонирующих и аккумулялирующих процессов переноса может активизировать отрицательные экологические явления в пределах земельных участков. Последующий анализ с учетом фактических данных о состоянии окружающей среды на территории города позволит повысить объективность оценки экологической ситуации в пределах отдельных кадастровых кварталов. Картографическая визуализация результатов оценки в комплексе со схемой кадастрового деления территории предоставит наглядное отображение пространственной взаимосвязи различных функциональных зон с выделенными потоковыми структурами, определяющими области переноса и накопления загрязняющих веществ. Интерпретация вышеописанного набора данных обеспечит выполнение дифференциации кадастровых кварталов по экологической обстановке.

#### Методы исследования

Для реализации интегрированного подхода к экологической оценке урбанизированных территорий предлагается рассматривать в комплексе природную и техногенную составляющие, как показано на рис. 1.

Процессы распространения загрязняющих веществ определяются, прежде всего, природными особенностями территории, в большей степени рельефом, обуславливающим направления миграции загрязнителей на подстилающей поверхности, в водной среде, а также отчасти в приземном слое атмосферы. Предлагается рассматривать их как *природные потоковые системы*.

Особенности городской инфраструктуры формируют антропогенные каналы переноса вещества и энергии и могут быть охарактеризованы как *городские потоковые системы*. Наиболее значимым элементом этих систем выступают объекты транзитного стока – канализационные коллекторы, коммуникационные каналы (тепловая сеть, транспорт и т. д.). Соответственно анализ взаимодействия эт-

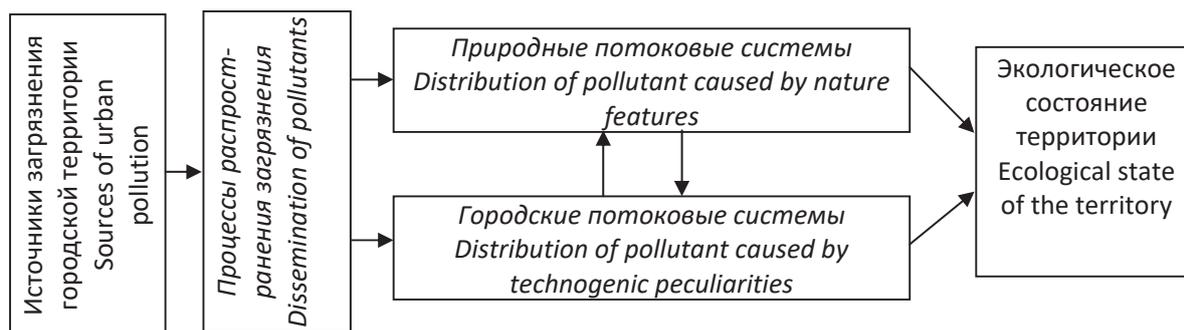


Рис. 1. Распространение загрязняющих веществ в городской среде

Fig. 1. Dissemination of pollutants in the urban environment

их потоков позволит повысить объективность оценки экологической обстановки города.

Для всестороннего анализа перечисленной пространственной информации и связанных с ней непространственных (атрибутивных) данных предлагается моделировать экологические процессы на территории города средствами современных ГИСТехнологий на основе интеграции данных, представленных на рис. 2:

Как видно из рис. 2, принципиальная последовательность процесса интеграции разнородных данных для учета экологической составляющей при ведении Государственного кадастра недвижимости включает в себя две основных группы действий: сбор и систематизация исходных данных и геоинформационное моделирование экологической обстановки города с учетом потоковых систем.



Рис. 2. Принципиальная последовательность процесса интеграции разнородных данных для учета экологической составляющей при ведении Государственного кадастра недвижимости

Fig. 2. The main sequence of actions to integrate heterogeneous data to include the environmental component into the system of state real property cadastre

Для формирования геоинформационной модели территории необходимы базовые пространственные данные на территорию (топографические карты и материалы аэрокосмических съемок). Это послужит основой для создания цифровой модели местности (ЦММ), включающей в себя цифровую модель рельефа (ЦМР) и трехмерную цифровую модель объектов местности (ЦМО).

Аналізу экологического состояния городской территории должен предшествовать анализ морфологии рельефа, как совокупности упорядоченных форм, возникших под действием гравимагнитных полей, действие которых на земной поверхности проявляется в виде потоков почвенно-геологического вещества. Эти потоки, в свою очередь, определяют направление движения техногенных веществ, образующихся в результате действия тех или иных природных либо антропогенных источников загрязнения. Анализировать рельеф в таком контексте позволяет метод «пластики рельефа», который основан на геометрическом преобразовании горизонталей топографических карт либо изогипс и структурных карт любого масштаба в морфоизографы [9, 10].

Для оценки вклада рельефа в различные природные или техногенные процессы необходимо определить его количественные характеристики. С этой точки зрения одним из наиболее эффективных методов изучения рельефа является морфометрический анализ. В настоящее время разработан и применяется целый ряд методик, позволяющих определять морфометрические показатели и отображать их на морфометрических картах различного содержания и назначения. Также многими специалистами предлагаются уникальные авторские системы морфометрических показателей и алгоритмы их определения. Зачастую морфометрические исследования базируются на анализе крутизны и экспозиции склонов, поскольку именно эти параметры определяют значения инсоляции и величину поверхностного стока. Для оценки пространственного распределения (в частности, направления и скорости) потоков вещества используют такие показатели, как горизонтальная и вертикальная кривизна [11, 12]. Форма поверхности тел рельефа может быть описана и другими морфометрическими показателями [13–15].

Представление рельефа в виде ЦМР значительно расширяет возможности морфометрического анализа. Использование геоинформационных систем (ГИС) позволяет осуществлять трехмерную визуализацию на разных этапах моделирования, что повышает наглядность создаваемых моделей и способствует более эффективному изучению морфометрических свойств рельефа. При наличии соответствующих технологических возможностей в используемой ГИС ЦМР могут создаваться в интерактивном режиме, что упрощает восприятие информации. Таким образом, ЦМР оптимизируют процесс изучения взаимосвязей между пространственными объектами, существенно дополняя численные модели.

Комплексный анализ вышеперечисленных морфометрических показателей, определяемых по ЦМР, позволяет выявлять зоны транзита и аккумуляции загрязняющих веществ. Результатом анализа являются *цифровые модели пространственного распределения природных потоков вещества*. Для удобства дальнейшего использования они визуализируются в виде цифровых карт или трехмерных картографических моделей [5].

Степень детальности отображения топографии поверхности при построении ЦМР зависит от исходных материалов, использованных для получения данных о рельефе. Одним из широко используемых методов при анализе природной среды является формирование ЦМР по горизонталям; в этом случае основным источником выступают топографические карты разных масштабов [16, 17]. Поскольку горизонталы были получены в результате преобразований исходных данных (интерполяция по точкам), итоговое цифровое представление поверхности получается несколько искаженным за счет сглаживания форм микро- и нанорельефа. Следует заметить, что существенность этого искажения может проявиться только при крупномасштабных исследованиях. В таком случае целесообразно использовать данные дистанционного зондирования и лазерного сканирования, при которых построение ЦМР осуществляется по непосредственно измеренным данным, что обеспечивает более высокую ее точность [18–20], в том числе и при обследовании территории с густым лесным покровом [21] или высотной застройкой высокой плотности [22, 23].

Вторым важным этапом учета экологической составляющей в кадастровой оценке является анализ состояния окружающей среды на территории города. Массив соответствующих исходных данных формируется в ходе ведения уполномоченными органами Росгидромета локального экологического мониторинга. Получение информативных и объективных результатов экологической оценки обеспечивается сбором и анализом детальных сведений о загрязнении отдельных компонентов окружающей среды и определением комплексных и интегральных характеристик экологической ситуации.

В качестве методологической основы моделирования состояния окружающей среды города выступают структурирование и геоинформационный анализ пространственных данных экологического характера, приемы которого устанавливаются в зависимости от исследуемого природного компонента и типа загрязнения [24]. Проведенные исследования позволили сформировать перечень данных о состоянии компонентов окружающей среды, которые достаточны для получения комплексной характеристики состояния окружающей среды в пределах кадастровых кварталов. Ниже перечислены рассматриваемые виды загрязнений и основные показатели, характеризующие их интенсивность:

- загрязнение атмосферы города (выбросы стационарных промышленных источников, загрязненность воздуха на автомагистралях, общая запыленность атмосферного воздуха);
- загрязнение водоемов и водотоков в черте города (локализация и объемы сбросов промышленных и коммунально-бытовых стоков, концентрация приоритетных загрязняющих веществ, классы качества воды);
- загрязнение городских почв (местоположение полигонов твердых бытовых и промышленных отходов, комплексный показатель загрязнения почв тяжелыми металлами, локализация техногенных геохимических аномалий);
- шумовое загрязнение от городского транспорта;
- естественный радиационный фон (концентрация радона в почвенном воздухе, наличие и размещение тектонических элементов, обуславливающих повышенный уровень естественного радиационного фона, например – выходов гранитных массивов на поверхность).
- техногенное радиационное загрязнение (наличие и размещение источников ионизирующего излучения, участков техногенного радиационного загрязнения);
- комплексный показатель состояния окружающей среды, определенный в ходе экологического зонирования территории для каждого кадастрового квартала, выделенного на территории города в соответствии с утвержденной схемой кадастрового деления.

Геоинформационный анализ и моделирование вышеперечисленных данных выполняется в ГИС, обладающих развитым инструментарием в области построения и исследования картографических 3D-моделей, установления пространственных связей между объектами. Это позволяет решать следующие задачи:

- выявление основных закономерностей загрязнения подстилающей поверхности для экологически безопасного планирования развития жилой застройки;
- определение и оценка эрозионного риска, вынесение рекомендаций по использованию различных участков местности с учетом эрозионной ситуации;
- моделирование зон загрязнения приземного слоя атмосферы крупными стационарными источниками (ТЭЦ и т. п.) для планирования высотной жилой застройки (выше 16 этажей);
- анализ распространения потоков загрязняющих веществ от существующих и планируемых промышленных объектов различного назначения;
- обоснование размещения новых жилых и зеленых зон, проектируемых промышленных предприятий и объектов инфраструктуры с учетом требований экологической безопасности для здоровья населения;
- выявление приоритетных направлений в области охраны окружающей среды, вынесение ре-

комендаций по улучшению качества жизни населения.

В целом результаты 3D-моделирования закладывают основу для детальной оценки городской окружающей среды с учетом различных критериев (кадастровых, геодинамических, экологических, медико-биологических) и создания результирующей картографической продукции соответствующей тематики, выступающей как часть информационного обеспечения по территориальному планированию использования городских земель [25].

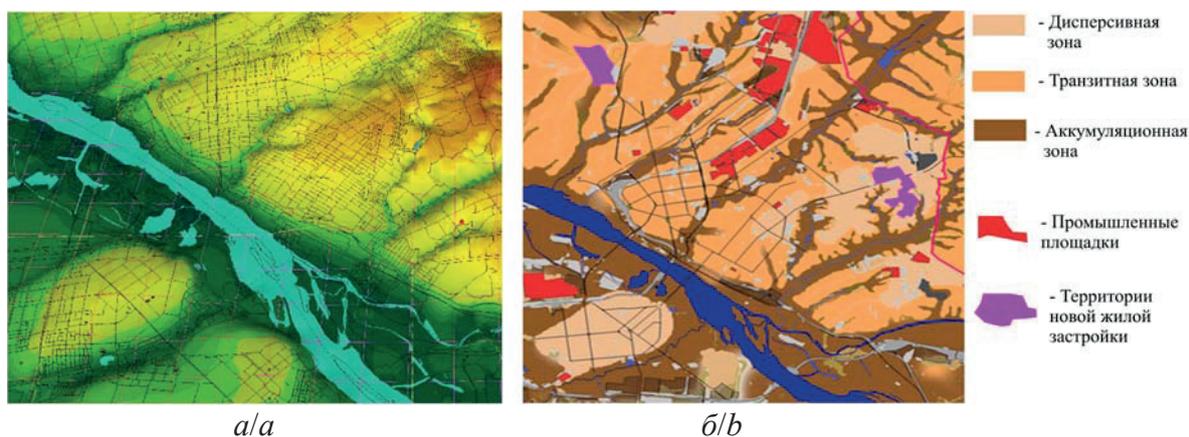
#### Результаты исследований

Апробация изложенных подходов реализуется для анализа экологической обстановки территории г. Новосибирска.

Для изучения природных и техногенных потоков, формирующихся на территории города, была создана цифровая модель рельефа и сформированы тематические слои, содержащие основные элементы инфраструктуры, средствами ГИС «Карта» (Фрагмент цифровой модели местности, созданной на основе этой модели, представлен на рис. 3, а). В качестве исходных источников использовались топографические карты масштаба 1:25000 на территорию в административных границах г. Новосибирска, и карты масштаба 1:100000 на пригородную зону. Сформированы изоморфографы, выделяющие плановое положение потоков (рис. 3, б). Выполнен расширенный морфометрический анализ рельефа. По ЦМР построены производные трехмерные картографические модели крутизны, экспозиции склонов, горизонтальной и вертикальной кривизны, выделены зоны дисперсий и депрессий.

Далее был осуществлен сбор и картографическое моделирование данных о загрязнении основных природных компонентов города. Использовались исходные данные, полученные Западно-Сибирским центром мониторинга окружающей среды и рядом организаций, ведущих исследования в области геологии, гидрогеологии и радиационной обстановки Новосибирской области (ГУФП «Березовгеология» и пр.) [24, 26]. Было выполнено нормирование наблюдаемых концентраций загрязняющих веществ относительно утвержденных в законодательном порядке санитарно-гигиенических нормативов (предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ и предельно допустимых уровней воздействия на окружающую среду). Осуществлен оверлейный анализ закономерностей пространственного распространения загрязняющих веществ в атмосфере, на подстилающей поверхности, в почвах и поверхностных водах. Рассчитан комплексный показатель состояния окружающей среды для каждой территориальной ячейки, на основании чего было выполнено экологическое зонирование городской территории [27].

Проведенные работы позволили сформировать достоверное и детальное представление о природ-



**Рис. 3.** Геоинформационное моделирование влияния рельефа на перенос загрязняющих веществ: а) фрагмент цифровой модели рельефа со схемой кадастрового деления; б) фрагмент трехмерной картографической модели распределения природных потоков

**Fig. 3.** Geoinformation modelling of relief influence on pollutant dissemination: a) fragment of a digital terrain model supplemented by a cadastral division scheme; b) fragment of cartographic 3D-model of distribution of natural flows

ных и техногенных потоках загрязняющих веществ, действующих на территории города и выполнить анализ размещения экологически опасных техногенных объектов. В качестве таковых рассматривались полигоны твердых бытовых отходов (ТБО).

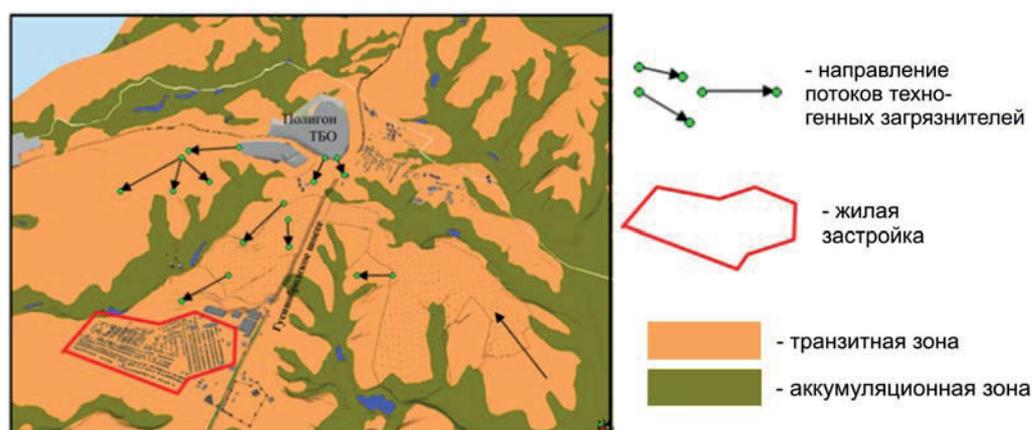
Анализ расположения полигонов ТБО на территории города показал, что выбор места расположения не всегда удачен с точки зрения воздействия на ближайшую территорию. Так, например, один из крупнейших в городе полигонов ТБО находится в зоне транзита загрязняющих веществ, что обуславливает высокий риск переноса загрязняющих веществ в зоны жилых кварталов (рис. 4).

Таким образом, созданные 3D-модели позволили установить территориальные закономерности распределения загрязняющих веществ, выделить зоны сноса, транзита и аккумуляции. Данный под-

ход может использоваться при оценке экологического ущерба как от существующих техногенных объектов, так и от проектируемых.

#### Выводы

Геоинформационное моделирование природных и городских потоковых систем на территории города обеспечивает системное рассмотрение городской территории и повышает объективность экологической оценки состояния окружающей среды. Реализация предложенного подхода позволяет рассматривать кадастровый квартал в качестве элементарного участка исследуемой территории и, следовательно, дифференцировать кадастровые кварталы по экологической обстановке и более достоверно учитывать экологическую составляющую при оценке объектов недвижимости.



**Рис. 4.** Направление потоков техногенного загрязнения в районе полигона ТБО

**Fig. 4.** Distribution of flows of technogenic pollution around the landfill

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика государственной кадастровой оценки земель поселений. – М.: Государственный комитет Российской Федерации по земельной политике, 2000. – 14 с.
2. Учет экологических факторов в кадастре недвижимости для целей управления устойчивым развитием урбанизированных территорий / А.В. Шепелева, В.В. Засядь-Волк, С.Н. Максимов, Т.А. Алиев, Т.А. Заболотская // Материалы Международной конференции «ИнтерКарто/ИнтерГИС». – Мельбурн, 2016. – Т. 22. – № 2. – С. 244–255.
3. Панов Д.В. Анализ методик учета экологической компоненты в кадастре городских земель // Материалы Международного научного конгресса Интерэкспо Гео-Сибирь – Смоленск, 2012. – Т. 2. – № 3. – С. 173–176.
4. Кочетова В.А. Кадастровая оценка городских земель на основе учета экологических факторов // Science Time. – 2015. – № 12 (24). – С. 422–425.
5. Креймер М.А., Трубина Л.К. Некоторые аспекты интеграции кадастра и геоэкологии в управлении землепользованием // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2009. – № 5. – С. 26–29.
6. Кравец Е.А. Анализ полноты и достоверности информации о загрязнении окружающей среды // Геодезия и картография. – 2006. – № 6. – С. 45–51.
7. Кравец Е.А. Картографическая логика (анализ вопросов состояния и охраны окружающей среды). – М.: МИИГАиК, 2010. – 157 с.
8. Бешенцев А.Н. Геоинформационные ресурсы: особенности, классификация, размещение // Информационные ресурсы России. – 2015. – № 4. – С. 21–26.
9. Степанов И.Н. Теория пластики рельефа и новые тематические карты. – М.: Наука, 2006. – 230 с.
10. Степанов И.Н. Пространство и время в науке о почвах. Недокучаевское почвоведение. – М.: Наука, 2003. – 184 с.
11. Shary P.A., Lees B., Tang G. Models of topography // Advances in Digital Terrain Analysis. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. – Berlin: Springer – Verlag, 2008. – P. 29–57.
12. Li Z., Zhu Q., Gold C. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. – Boca Raton: CRC Press, 2004. – 323 p.
13. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. – 2002. – V. 107 (1–2). – P. 1–32.
14. Agterberg F. Geomathematics: Theoretical Foundations, Applications and Future Developments. – Berlin: Springer International Publ., 2014. – 553 p.
15. Pike R.J., Wilson S.E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis // Bull. Geol. Soc. Am. – 1971. – V. 82. – P. 1079–1084.
16. Кошкарёв А.В., Тикунов В.С. Геоинформатика / под ред. Д.В. Лисицкого. – М.: Картгеоцентр-Геоиздат, 1993. – 213 с.
17. Smith M.J., Clark C.D. Methods for the visualization of digital elevation models for landform mapping // Earth Surf. Process. Land. – 2005. – V. 30. – P. 885–900.
18. Bennett R., Welham K., Hill R.A. A Comparison of Visualization Techniques for Models Created from Airborne Laser Scanned Data // Archaeol. Prospect. – 2012. – V. 19. – P. 41–48.
19. Yu P., Eyles N., Sookhan S. Automated drumlin shape and volume estimation using high resolution LiDAR imagery (Curvature Based Relief Separation): a test from the Wadena Drumlin Field, Minnesota // Geomorphology. – 2015. – V. 246. – P. 589–601.
20. Tarolli P. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges // Geomorphology. – 2014. – V. 216. – P. 295–312.
21. Evans J.S., Hudak A.T. A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return LiDAR in forested environments // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2007. – V. 45. – P. 1029–1038.
22. Change detection of buildings using an airborne laser scanner / H. Murakami, K. Nakagawa, H. Hasegawa, T. Shibata, E. Iwanami // ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. – 1999. – V. 54. – P. 148–152.
23. Vu T.T., Tokunaga M., Yamazaki F. Wavelet-based extraction of buildings features from Airborne Laser Scanner data // Canadian Journal of Remote Sensing. – 2002. – V. 29 (6). – P. 783–799.
24. Дышлюк С.С., Ромашова Л.А., Николаева О.Н. Об использовании экологических карт в создании экологической компоненты инфраструктурных пространственных данных // Геодезия и картография. – 2016. – № 4. – С. 20–27.
25. Интеграция геопространственных данных на основе трехмерного моделирования для экологической оценки городских территорий / Л.К. Трубина, Т.А. Хлебникова, О.Н. Николаева, Е.Н. Кулик // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4/с. – С. 83–86.
26. Гаврилов Ю.В., Николаева О.Н., Ромашова Л.А. Об опыте и результатах системного картографирования экологической ситуации Новосибирска // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2011. – № 3. – С. 91–94.
27. Николаева О.Н., Ромашова Л.А., Волкова О.А. Применение экологических карт в мониторинге состояния окружающей среды // Интерэкспо Гео-Сибирь 2013. Новосибирск, 2013. – Т. 1. – № 2. – С. 9–13.

Поступила 28.02.2018 г.

## Информация об авторах

**Трубина Л.К.**, доктор технических наук, профессор кафедры экологии и природопользования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

**Аврунев Е.И.**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой кадастра и территориального планирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

**Николаева О.Н.**, доктор технических наук, доцент кафедры экологии и природопользования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

**Каленицкий А.И.**, доктор технических наук, профессор кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

**Антипов И.Т.**, доктор технических наук, профессор-консультант кафедры физической геодезии и дистанционного зондирования Сибирского государственного университета геосистем и технологий.

UDC 528.44:528.9

## APPROACHES TO GEOINFORMATION MODELLING OF URBAN TERRITORY TO INTEGRATE THE ENVIRONMENTAL COMPONENT INTO THE SYSTEM OF STATE REAL PROPERTY CADASTRE

Lyudmila K. Trubina<sup>1</sup>,  
trubinalk@rambler.ru

Evgeny I. Avrunev<sup>1</sup>,  
kadastr204@yandex.ru

Olga N. Nikolaeva<sup>1</sup>,  
onixx76@mail.ru

Analoty I. Kalenitsky<sup>1</sup>,  
kaf.astronomy@ssga.ru

Iliia T. Antipov<sup>1</sup>,  
Siberian kaf.astronomy@ssga.ru

<sup>1</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies,  
10, Plakhotny Street, Novosibirsk, 630108, Russia.

**The relevance** of the discussed issue is caused by the necessity to enhance the objectivity and reliability of information on land plots in relation with the conducting reform of the system of State real property cadastre. The integration of an environmental component into the system of State real property cadastre is relevant to the maintenance of high-polluted urban territories. Nowadays there are no approved standards in this field, and various techniques proposed by experts are based on analysis and assessment of existing contamination levels of environment components. The urban environment is not considered as a dynamic system, and its development over time and space is not taken into account. Thus, the complex analysis of time and space dynamics of pollutants in accordance with natural conditions and city infrastructure is essential for the system analysis of urban environment.

**The aim** of the study was to determine an approach to integrate environmental component into the system of State real property cadastre by geoinformation analysis and 3D cartographic modeling of time and space dynamics of pollutants in urban environment.

**The methods:** geoinformation analysis, cartographic modeling, cartographic visualization techniques, 3D cartographic modeling.

**The results.** The authors have proposed the approach to assess urban environment taking into account the patterns of pollution dissemination and proved the logical sequence of integration of heterogeneous environmental data for modeling pollution distribution. The digital relief model and digital terrain model of Novosibirsk city were formed. The environmental database of Novosibirsk city was developed. The authors carried out the zoning of city territory by composite index regarding environmental risk and designed a 3D model of pollution dissemination.

**Conclusion.** The approach introduced provides the dynamic analysis of urban environment as a result of interaction of natural and anthropogenic processes determining pollution dissemination. This provides the detailed and objective assessment of environment of cadastral quarters and lays the foundation for integration of the environmental component into the system of State real property cadastre.

### Key words:

Pollution dissemination, city environment, environmental assessment, geoinformation analysis, digital relief model, cartographic modeling, 3D cartographic modeling, real property cadastre.

### REFERENCES

1. *Metodika gosudarstvennoy kadastrvoy otsenki zemel poseleniy* [Method of state cadastral valuation of land settlements]. Moscow, Gosudarstvenny komitet Rossiyskoy Federatsii po zemelnoy politike, 2000. 14 p.
2. Shepeleva A.V., Zasyad-Volk V.V., Maksimov S.N., Aliev T.A., Zabolotskaya T.A. Uchet ekologicheskikh faktorov v kadastrе nedvizhimosti dlya tseye upravleniya ustoychivym razvitiem urbanizirovannykh territoriy [Registration of ecological factors in the real estate cadaster for controlling sustainable development of urban territories]. *Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii «InterKarto/InterGIS»* [Proc. Int. Conf. «InterKarto/InterGIS»]. Melbourne, 2016. Vol. 22, no. 2, pp. 244–255.
3. Panov D.V. Analiz metodik ucheta ekologicheskoy komponenty v kadastrе gorodskikh zemel [Analysis of the techniques for determining ecological component in urban lands cadastre]. *Materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa Interekspo Geo-Sibir* [Proc. Int. Cong. Interekspo Geo-Sibir]. Smolensk, 2012. Vol. 2, no. 3, pp. 173–176.
4. Kochetova V.A. Kadastrrovaya otsenka gorodskikh zemel na osnove ucheta ekologicheskikh faktorov [Cadastre assessment of urban land based on environmental factors]. *Science Time*, 2015, no. 12 (24), pp. 422–425.
5. Kreymer M.A., Trubina L.K. Nekotorye aspekty integratsii kadastra i geoekologii v upravlenii zemlepolzovaniem [Some aspects of integrating cadastre and geoecology in land-use management]. *Geodesy and aerophotography*, 2009, no. 5, pp. 26–29.
6. Kravets E.A. Analiz polnoty i dostovernosti informatsii o zagryaznenii okruzhayushhey sredy [Analysis of completeness and reliability of information about environmental pollution]. *Geodesy and cartography*, 2006, no. 6, pp. 45–51.
7. Kravets E.A. *Kartograficheskaya logika (analiz voprosov sostoyaniya i okhrany okruzhayushchey sredy)* [Mapping logic (analysis on the status and protection of the environment)]. Moscow, MIIGAiK Publ., 2010. 157 p.
8. Beshentsev A.N. Geoinformatsionnye resursy: osobennosti, klassifikatsiya, razmeshchenie [Geographic information resources: features, classification, placement]. *Information resources of Russia*, 2015, no. 4, pp. 21–26.

9. Stepanov I.N. *Teoriya plastiki relefa i novye tematicheskie karty* [Theory of relief sculpture and new thematic maps]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 230 p.
10. Stepanov I.N. Prostranstvo i vremya v nauke o pochvakh. Nedokuchaevskoe pochvovedenie [Space and time in the science of soils. Non-Dokuchaevs' soil science]. Moscow, Nauka Publ., 2003. 184 p.
11. Shary P.A., Lees B., Tang G. Models of topography. Advances in Digital Terrain Analysis. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*. Berlin, Springer – Verlag, 2008. pp. 29–57.
12. Li Z., Zhu Q., Gold C. Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. Boca Raton, CRC Press, 2004. 323 p.
13. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 2002, vol. 107 (1–2), pp. 1–32.
14. Agterberg F. *Geomathematics: Theoretical Foundations, Applications and Future Developments*. Berlin, Springer International Publ., 2014. 553 p.
15. Pike R.J., Wilson S.E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. *Bull. Geol. Soc. Am.*, 1971, vol. 82, pp. 1079–1084.
16. Koshkarev A.V., Tikunov V.S. *Geoinformatika* [Geoinformatics]. Ed. by D.V. Lisitsky. Moscow, Kartgeotsentr-Geoizdat Publ., 1993. 213 p.
17. Smith M.J., Clark C.D. Methods for the visualization of digital elevation models for landform mapping. *Earth Surf. Process. Land.*, 2005, vol. 30, pp. 885–900.
18. Bennett R., Welham K., Hill R.A. A Comparison of Visualization Techniques for Models Created from Airborne Laser Scanned Data. *Archaeol. Prospect.*, 2012, vol. 19, pp. 41–48.
19. Yu P., Eyles N., Sookhan S. Automated drumlin shape and volume estimation using high resolution LiDAR imagery (Curvature Based Relief Separation): a test from the Wadena Drumlin Field, Minnesota. *Geomorphology*, 2015, vol. 246, pp. 589–601.
20. Tarolli P. High-resolution topography for understanding Earth surface processes: Opportunities and challenges. *Geomorphology*, 2014, vol. 216, pp. 295–312.
21. Evans J.S., Hudak A.T. A multiscale curvature algorithm for classifying discrete return LiDAR in forested environments. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2007, vol. 45, pp. 1029–1038.
22. Murakami H., Nakagawa K., Hasegawa H., Shibata T., Iwanami E. Change detection of buildings using an airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 1999, vol. 54, pp. 148–152.
23. Vu T.T., Tokunaga M., Yamazaki F. Wavelet-based extraction of buildings features from Airborne Laser Scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 29 (6), pp. 783–799.
24. Dyshlyuk S.S., Romashova L.A., Nikolaeva O.N. Ob ispolzovanii ekologicheskikh kart v sozdanii ekologicheskoy komponenty infrastruktury prostranstvennykh dannykh [Application of ecological maps in creation of the environmental components of spatial data infrastructure on municipal level]. *Geodesy and cartography*, 2016, no. 4, pp. 20–27.
25. Trubina L.K., Hlebnikova T.A., Nikolaeva O.N., Kulik E.N. Integratsiya geoprostranstvennykh dannykh na osnove trekhmernogo modelirovaniya dlya ekologicheskoy otsenki gorodskikh territoriy [3D-model-based Geospatial Data Integration for Environmental Impact Assessment in urban areas]. *Geodesy and aerophotography*, 2013, no. 4/c, pp. 83–86.
26. Gavrillov Yu.V., Nikolaeva O.N., Romashova L.A. Ob opyte i rezultatakh sistemnogo kartografirovaniya ekologicheskoy situatsii Novosibirska [Experience and results of system mapping of environmental situation in Novosibirsk]. *Geodesy and aerophotography*, 2011, no. 3, pp. 91–94.
27. Nikolaeva O.N., Romashova L.A., Volkova O.A. Primenenie ekologicheskikh kart v monitoringe sostoyaniya okruzhayushchey sredy [Ecological maps application for environment monitoring]. Materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo kongressa Interekspo Geo-Sibir 2013 [Proc. Int. Cong. Interekspo Geo-Sibir 2013]. Novosibirsk, 2013. Vol. 1, no. 2, pp. 9–13.

Received: 28 February 2018.

#### Information about the authors

**Lyudmila K. Trubina**, Dr. Sc., professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

**Evgeny I. Avrunev**, Cand. Sc., head of the department, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

**Olga N. Nikolaeva**, Dr. Sc., associate professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

**Anatoly I. Kalenitsky**, Dr. Sc., professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

**Ilya T. Antipov**, Dr. Sc., professor, Siberian State University of Geosystems and Technologies.

УДК 662.7

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАКТОРОВ ЧАСТИЧНОГО ОКИСЛЕНИЯ ЭНЕРГОХИМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Мракин Антон Николаевич<sup>1</sup>,  
anton1987.87@mail.ru

Николаев Юрий Евгеньевич<sup>1</sup>,  
niko00949@mail.ru

Сотников Дмитрий Геннадьевич<sup>1</sup>,  
sotnikovdg@gazprommash.ru

Табакеев Роман Борисович<sup>2</sup>,  
TabakaevRB@tpu.ru

Селиванов Алексей Александрович<sup>1</sup>,  
selivanovaasstu@mail.ru

<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования обуславливается необходимостью повышения энергоэффективности в области использования углеводородов для комбинированной выработки химической продукции и энергоносителей с применением технологий газификации. Это даст возможность снижать издержки производства и расширять возможности газохимии.

**Цель исследования:** определение термодинамической эффективности реакторов частичного окисления топлива, входящих в состав энергохимических установок комбинированной выработкой энергоносителей и синтез-газа. Основное внимание уделено влиянию режимных параметров на численное значение эксергетического КПД.

**Объект:** реактор частичного окисления с набором вспомогательного оборудования, обеспечивающий получение синтез-газа. При этом учитывается системный фактор, т. е. параметры энергосистемы, в рамках которой планируется сооружение подобного типа энергохимической установки.

**Методы:** проведение численного эксперимента с привлечением традиционных подходов к составлению эксергетического баланса теплоэнергетических установок. Также использованы разработанные ранее авторами математические модели для расчета параметров синтез-газа, образующегося в процессе переработки углеводородного сырья в проточных автотермических некаталитических реакторах.

**Результаты.** Полученные результаты позволяют выбирать наиболее целесообразные режимные параметры работы реактора частичного окисления, входящего в состав энергохимических установок с газификацией нестабильного газового конденсата. Так, максимальные значения эксергетического КПД достигаются при использовании атмосферного воздуха без обогащения кислородом как для случая с подачей водяного пара ( $\eta_{\text{ex}}=78-83\%$ ), так и для случая без подачи пара ( $\eta_{\text{ex}}=82-88\%$ ). При этом некоторые варианты тепловых схем энергохимических установок с газификацией топлива в термодинамическом плане могут считаться равноэффективными, а решение по количеству подаваемого водяного пара в зону реакции должно соответствовать требованиям к синтез-газу. Выбор уровня рабочего давления в реакторе требует дополнительных исследований, поскольку очевидность применения реактора атмосферного типа на данном этапе исследований не выявлена.

### Ключевые слова:

Газовый конденсат, эксергия, дутьевой пар, кислород, газификация, реактор, синтез-газ, электроэнергия.

### Введение

Традиционные методы повышения энергоэффективности теплоэнергетических установок на сегодняшний день можно считать исчерпанными, и все чаще встречаются публикации о разработке новых технологий, в том числе базирующихся на энерготехнологическом использовании топлива [1] и применении новых принципов регенерации теплоты отходящих продуктов сгорания [2, 3].

Также остро вопросы энергоэффективности стоят и в нефтегазовом секторе национальной экономики. Например, установки по стабилизации газового конденсата отличаются довольно высокими

показателями потребления энергоресурсов: электроэнергии – до 2 кВт·ч/т конденсата, топливного газа – до 50 кг у.т./т конденсата; воды оборотной – до 1 м<sup>3</sup>/т конденсата [4]. К тому же эти установки отличаются высокими капиталовложениями, и их применение оправдано на месторождениях или предприятиях с большой производительностью. На малых и средних месторождениях стабилизация газового конденсата экономически нерентабельна и требуется разработка специальных высокоэффективных инновационных установок и методов их вовлечения в топливно-энергетический баланс страны.

Одним из возможных путей использования нестабильного газового конденсата является его газификация [5] с комбинированной выработкой энергоносителей (тепловой и электрической энергии) и технологического газа, содержащего СО и Н<sub>2</sub>. При наличии спроса предлагаемая установка может обеспечивать потребителей инертным газом (защитной атмосферой) в виде СО<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>. Основной процесс газификации топлива в таких установках происходит в реакторе частичного окисления, в который подается топливо (в данном случае нестабильный газовый конденсат), окислитель и дутьевой пар для повышения содержания водорода в продуктах реакции. При этом качество синтез-газа (содержание СО и Н<sub>2</sub>, его температура) будет находиться в определенной зависимости от режимных факторов.

Происходящие в реакторе частичного окисления термохимические и термодинамические процессы превращения одних видов энергии в другие заканчиваются при наступлении термодинамического равновесия рассматриваемой системы, определяемого вторым законом термодинамики [6].

В практике научных исследований все большую популярность приобретают методы термодинамического анализа, основанные на эксергетическом балансе, главным достоинством которого является наличие единого безразмерного относительного показателя совершенства, который учитывает не только количество энергии, но и ее качество на основе второго закона термодинамики [7–10]. Особенно такая методология актуальна для энерготехнологических или энергохимических установок с комплексным использованием топлива, предназначенных для комбинированной выработки электрической и тепловой энергии, а также

химических продуктов [11–14]. Так, в [12] проведен анализ эксергетической эффективности отдельных процессов и всей тепловой схемы малой электростанции с газификацией угля, которая производит электрическую и тепловую энергию, а также серу в качестве побочного продукта, а в работе [13] в качестве побочного продукта работы угольной электростанции рассматривается активированный уголь.

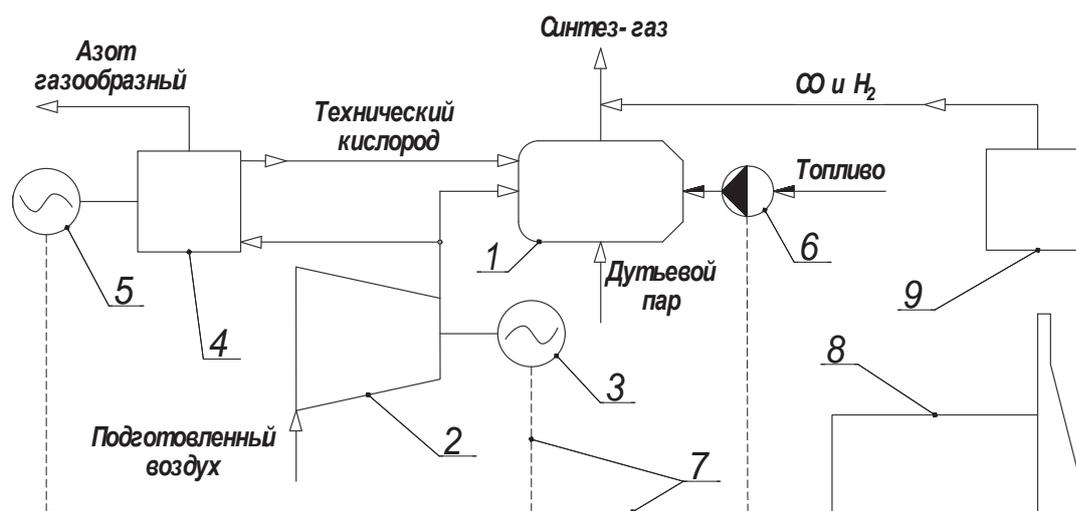
#### Методика исследования

Представляется целесообразным выполнить обоснование параметров дутья (концентрации кислорода, степени повышения давления, энтальпии и количества водяного пара) подаваемого в реактор частичного окисления энергохимических установок, поскольку они оказывают влияние на общую эффективность получения синтез-газа. Расчетная схема представлена на рис. 1.

В такой постановке задачи эксергетический КПД процесса частичного окисления топлива можно представить в виде

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_{cr}}{G_T \cdot ex_T + G_{H_2O} \cdot ex_{H_2O} + G_{ок} \cdot ex_{ок} + Ex_a}, \quad (1)$$

где  $Ex_{cr} = G_{cr} \cdot ex_{cr}$  – эксергия образовавшегося синтез-газа, кВт;  $G_{cr}$  – массовый расход синтез-газа, кг/с;  $ex_{cr}$ ,  $ex_T$ ,  $ex_{H_2O}$ ,  $ex_{ок}$  – удельная эксергия синтез-газа, потребленного топлива (газового конденсата), водяного пара и окислителя (воздуха), кДж/кг;  $G_T$ ,  $G_{H_2O}$ ,  $G_{ок}$  – расход топлива, водяного пара и окислителя, кг/с;  $Ex_a$  – эксергия топлива, эквивалентная затраченной электроэнергии на привод компрессора окислителя, топливного насоса и обеспечение работы воздухоразделительной установки, кВт.



**Рис. 1.** Расчетная схема материально-энергетических потоков для определения эксергетического КПД: 1 – реактор частичного окисления (РЧО); 2 – компрессор воздуха; 3 – электродвигатель компрессора; 4 – воздухоразделительная установка; 5 – электропривод воздухоразделительной установки; 6 – топливный насос; 7 – транзитные сети электроснабжения; 8 – электростанция; 9 – замещающая установка

**Fig. 1.** Design scheme of material-energy flows for determining exergy efficiency: 1 is the partial oxidation reactor (POR); 2 is the air compressor; 3 is the compressor motor; 4 is the air separation unit; 5 is the electric drive of the air separation unit; 6 is the fuel pump; 7 are the transit power supply networks; 8 is the power station; 9 is the replacement installation

Удельную эксергию синтез-газа будем определять согласно [15] как сумму физической эксергии (являющейся результатом отличия температуры и давления рассматриваемого потока от температуры и давления окружающей среды) и химической (являющейся результатом отличия химического состава или концентрации вещества, находящегося при параметрах окружающей среды, от распространенных в природе веществ или от вещества, принятого за начало отсчета), кДж/кг:

$$ex_{cr} = ex_{cr}^{\Phi} + ex_{cr}^x = R \cdot T_0 \cdot \ln \frac{p}{p_0} + C_p \cdot \left( T - T_0 - T_0 \cdot \ln \frac{T}{T_0} \right) + ex_{cr}^x, \quad (2)$$

где  $R$  – индивидуальная газовая постоянная, кДж/(кг·К);  $p$ ,  $T$  – давление и температура, МПа, К;  $C_p$  – изобарная теплоемкость, кДж/(кг·К);  $p_0$ ,  $T_0$  – давление и температура окружающей среды (начало отсчета), МПа, К;  $ex_{cr}^x = Q_{н}^p$  – химическая эксергия синтез-газа, кДж/кг;  $Q_{н}^p$  – низшая теплота сгорания (синтез-газа), кДж/кг.

Эксергия топлива (газового конденсата) будет определяться только ее химической составляющей, поскольку подогрева топлива перед подачей в реактор частичного окисления не предусмотрено. В общем виде имеется связь между эксергией топлива, представляющей собой максимальную работу химической реакции системы «топливо–воздух» при стехиометрическом соотношении между ними, которая может быть представлена выражением

$$ex_t = \beta \cdot Q_b^p, \quad (3)$$

где  $\beta$  – корреляционный коэффициент, зависящий от вида и состава топлива;  $Q_b^p$  – высшая теплота сгорания топлива (в данном случае газового конденсата), кДж/кг.

Расчетные значения коэффициентов  $\beta$  для определения как эксергии газового конденсата, так и получаемого синтез-газа, можно выбрать по рекомендациям [15] или [16].

Эксергия дутьевого пара определяется исходя из его параметров по специальным диаграммам состояния, приведенным в [15], или аналитическим путем с учетом рекомендаций [16].

Для предложенной к рассмотрению тепловой схемы установки эксергия окислителя стремится к нулю, т. к. он представляет собой атмосферный воздух, изменяющий значение физической эксергии только под влиянием климатических факторов.

Исходя из концепции системного термодинамического анализа энерготехнологических производств, учет эксергии входящих потоков электроэнергии должен проводиться по эксергии первичного топлива, расходуемого в энергосистеме на ее получение. Таким образом, можно получить выражение для расчета эксергии топлива, затраченного на получение электроэнергии, кВт:

$$Ex_o = \frac{N}{Q_{н}^p \cdot \eta_{эл} \cdot \eta_{сн}} \cdot \frac{ex_t}{\eta_{тр}}, \quad (4)$$

где  $N$  – электрическая мощность, затрачиваемая на привод компрессора, работу воздухоразделительной установки и прочих электроприемников, обеспечивающих получение синтез-газа, кВт;  $Q_{н}^p$  – низшая теплота сгорания (используемого в энергосистеме топлива), кДж/кг;  $\eta_{эл}$  – КПД теплового двигателя, используемого для получения электроэнергии;  $\eta_{сн}$  – коэффициент собственных нужд электростанции;  $ex_t$  – удельная эксергия топлива, расходуемого для выработки электроэнергии и определяемая согласно [15], кДж/кг;  $\eta_{тр}$  – коэффициент, учитывающий потери эксергии электроэнергии при транспортировке.

При расчете параметров образующегося синтез-газа использованы методические положения, изложенные в [17, 18]. Результаты расчета состава синтез-газа в зависимости от содержания кислорода в дутьевом воздухе и подачи водяного пара представлены на рис. 2, а массовый расход – на рис. 3.

### Результаты исследования

Параметры начала отсчета приняты: для давления на уровне 0,1 МПа и 15 °С – для температуры, что продиктовано возможностью сопоставить расчеты с номинальным режимом работы газотурбинных установок по стандарту ISO.

В качестве исходных данных принято: газовый конденсат Коптевского месторождения с составом, представленным в [5]; расход перерабатываемого нестабильного газового конденсата 1,0 кг/с; коэффициент расхода воздуха в камере РЧО  $\alpha=0,5$ ; параметры топлива, используемого в энергосистеме,  $Q_{н}^p=31\,800$  кДж/кг и  $Q_{в}^p=35\,290$  кДж/кг [19];  $\eta_{эл}=0,53$ ;  $\eta_{сн}=0,95$  [20];  $\eta_{тр}=0,92$ ; давление сжатого воздуха в компрессоре холодильного цикла низкого давления (цикла Капицы), необходимое для получения технического кислорода,  $p_{в-ха}=0,65$  МПа [21].

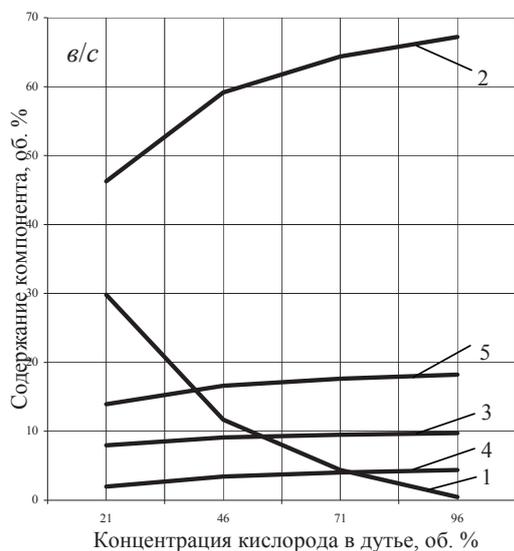
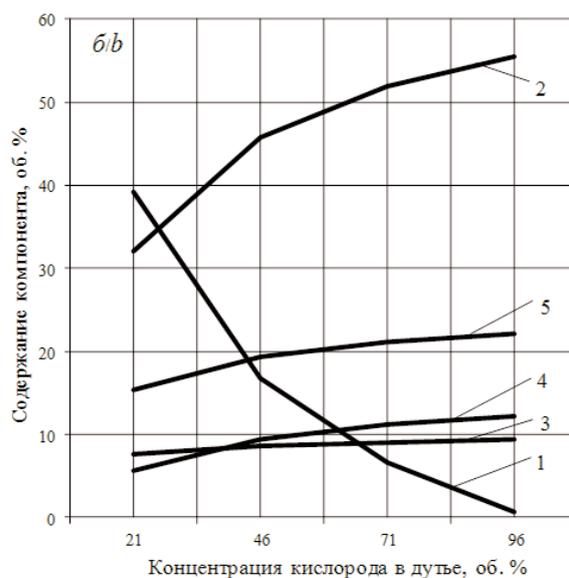
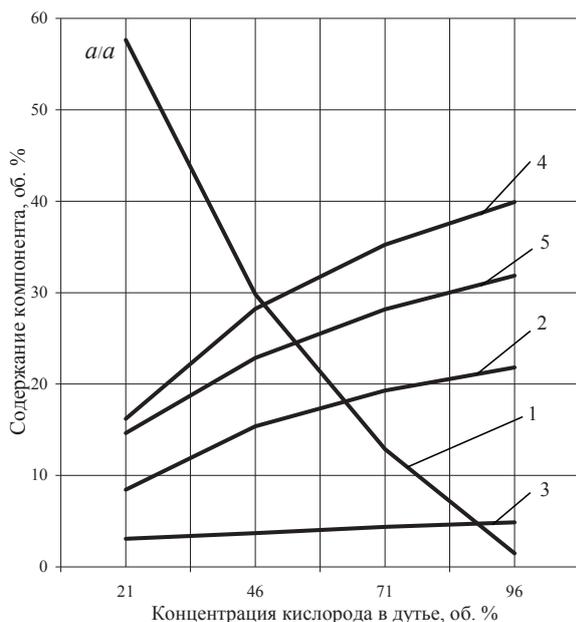
Параметры дутьевого насыщенного пара выбираются по уровню давления в реакторе частичного окисления, т. е. имеют индивидуальное значение для каждого варианта расчета и представлены в таблице.

**Таблица.** Параметры дутьевого пара

**Table.** Parameters of blowing steam

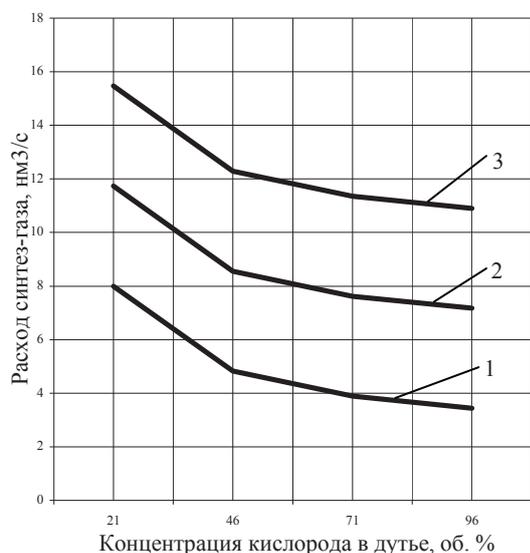
Параметр, ед. изм. Parameter, unit	Давление в РЧО, МПа/Pressure in the POR, MPa								
	0,1	0,3	0,5	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
Температура, °С Temperature, °C	100	134	152	168	180	190	198	200	212
Энтальпия, кДж/кг Enthalpy, kJ/kg	2675	2725	2748	2765	2777	2785	2790	2792	2798
Энтропия, кДж/(кг·°С) Entropy, kJ/(kg·°C)	7,36	6,99	6,82	6,68	6,58	6,51	6,44	6,43	6,33

Определение электрической мощности воздушного компрессора и топливного насоса осуществлялось расчетным путем в зависимости от уровня давления в РЧО, а также учитывался факт отключения воздухоразделительной установки при работе на атмосферном воздухе, без обогащения кислородом.



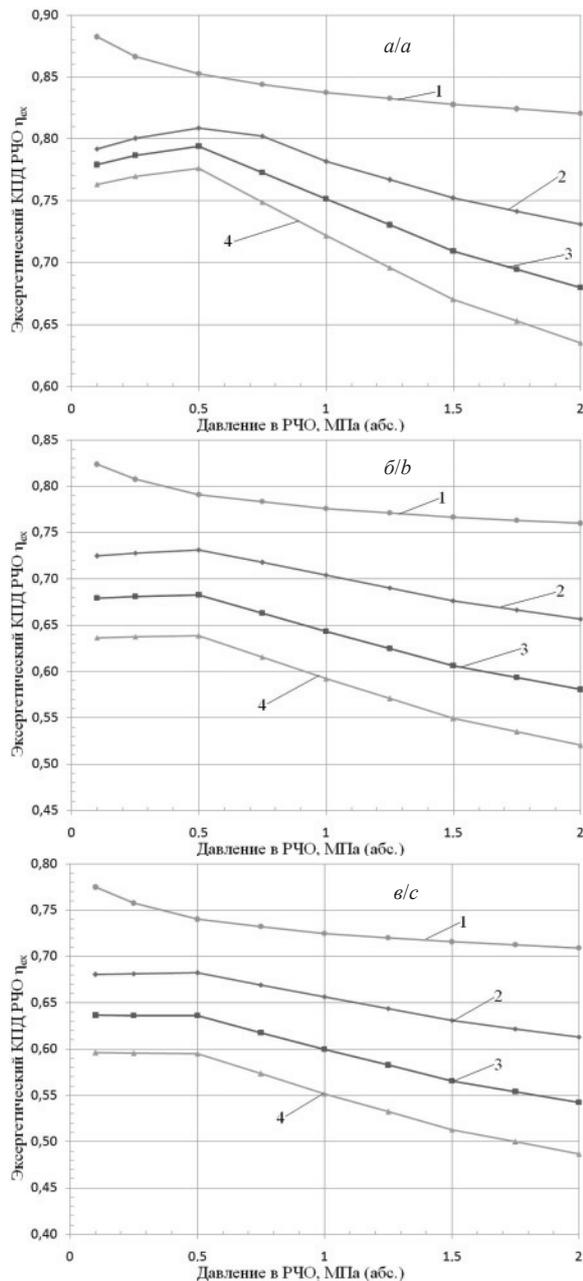
**Рис. 2.** Зависимость содержания компонентов синтез-газа при работе реактора с коэффициентом расхода воздуха 0,5 при атмосферном давлении и без подачи дутьевого пара (а), при подаче водяного пара в количестве 3 кг/кг конденсата (б) и 6 кг/кг конденсата (в) от концентрации кислорода в дутье: 1 – азот; 2 – водяные пары; 3 – диоксид углерода; 4 – оксид углерода; 5 – водород

**Fig. 2.** Dependence of content of the synthesis gas components when the reactor is operating with air flow rate factor of 0,5 at atmospheric pressure and without supply of blowing steam (a), when steam is supplied in the amount of 3 kg/kg of condensate (b) and 6 kg/kg of condensate (c) of oxygen concentration in the blast: 1 is the nitrogen; 2 is the water vapor; 3 is the carbon dioxide; 4 is the carbon monoxide; 5 is the hydrogen



**Рис. 3.** Объемный выход синтез-газа в зависимости от концентрации кислорода в дутье при работе реактора с коэффициентом расхода воздуха 0,5 при атмосферном давлении и различном количестве дутьевого пара: 1 –  $g=0$  кг пара/кг конденсата; 2 –  $g=3$  кг пара/кг конденсата; 3 –  $g=6$  кг пара/кг конденсата

**Fig. 3.** Volumetric yield of synthesis gas as a function of oxygen concentration in the blast when the reactor operates with air flow factor of 0,5 at atmospheric pressure with the amount of blowing steam: 1)  $g=0$  kg of vapor/kg of condensate; 2)  $g=3$  kg of vapor/kg of condensate; 3)  $g=6$  kg of steam/kg of condensate



**Рис. 4.** Зависимость эксергетического КПД реактора частичного окисления при  $g=0$  кг пара/кг конденсата (а),  $g=3$  кг пара/кг конденсата (б) и  $g=6$  кг пара/кг конденсата (в) от давления в реакторе частичного окисления: 1 –  $C_{O_2}=21\%$ ; 2 –  $C_{O_2}=46\%$ ; 3 –  $C_{O_2}=71\%$ ; 4 –  $C_{O_2}=96\%$

**Fig. 4.** Dependence of the exergy efficiency of the partial oxidation reactor at  $g=0$  kg of vapor/kg of condensate (a),  $g=3$  kg of vapor/kg of condensate (b),  $g=6$  kg of vapor/kg of condensate (c) on pressure in the partial oxidation reactor: 1)  $C_{O_2}=21\%$ ; 2)  $C_{O_2}=46\%$ ; 3)  $C_{O_2}=71\%$ ; 4)  $C_{O_2}=96\%$

Из представленных результатов численного моделирования РЧО видно, что качественные характеристики (содержание целевых компонентов – водорода и оксида углерода) зависят как от концентрации кислорода в дутьевом воздухе, так и от по-

дачи дутьевого водяного пара, также подобная зависимость наблюдается и от коэффициента расхода воздуха в РЧО [5].

Результаты расчетов эксергетического КПД по выражению (1) с использованием (2)–(4) при различной удельной подаче водяного пара  $g$ , обеспечивающей достижение различного состава синтез-газа, представлены на рис. 4. Выбор интервала изменения давления в реакторе частичного окисления продиктован степенью повышения давления в компрессорах современных ГТУ, обеспечивающих повышения давления до 20 раз.

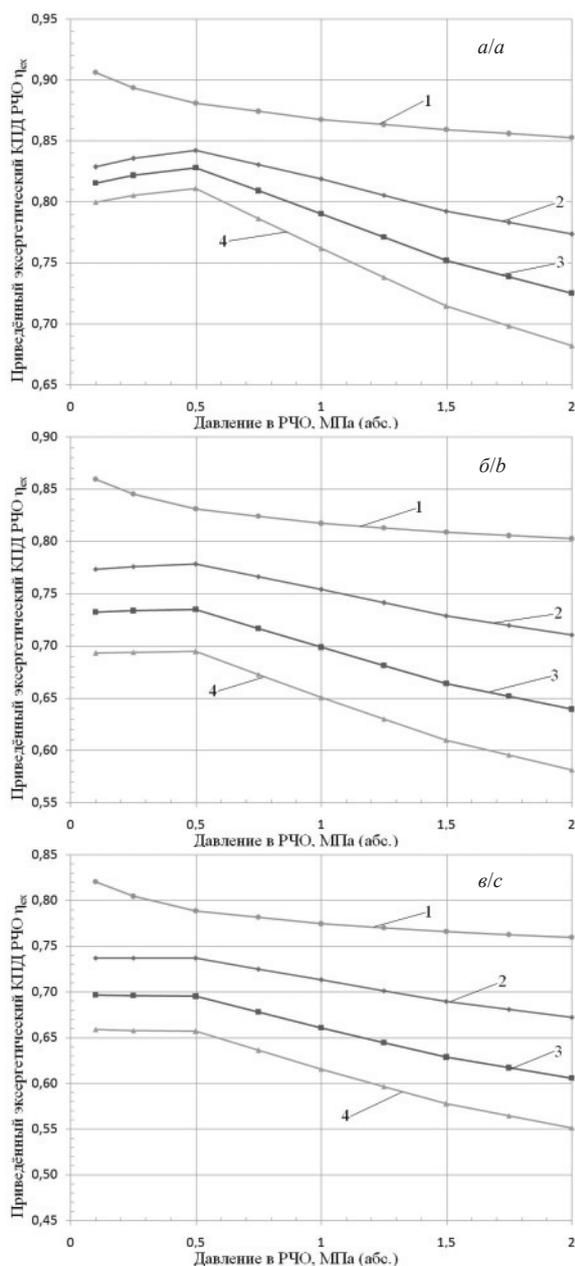
Наличие экстремумов на кривых 2–4 (рис. 4, а) объясняется тем, что по циклу Капицы для получения технологического кислорода необходимо повышать давление воздуха до 0,65 МПа, которое в последующем будет снижено до 0,1 и 0,5 МПа без получения полезной работы, что вызывает снижение эксергетического КПД. Также повышение давления в 2 раза с 0,5 до 1,0 МПа для случаев работы установок на атмосферном воздухе вызывает незначительное снижение эксергетического КПД на 1–2 абс. % для всех вариантов с различной подачей водяного пара. С переходом на использование обогащенного кислородом дутья эксергетический КПД снижается на 3–5 абс. % с последующей тенденцией к увеличению по мере роста содержания кислорода в дутьевом воздухе, что можно объяснить повышением доли затрат энергии на его получение. Применение дутьевого пара с термодинамической точки зрения также снижает эффективность процесса получения синтез-газа, что можно наблюдать на рис. 4, б, в, где экстремумы для кислородного дутья по мере увеличения подачи пара с  $g=3$  кг пара/кг конденсата до  $g=6$  кг пара/кг конденсата практически нивелируются за счет того, что абсолютные значения эксергии дутьевого пара начинает превалировать над соответствующим значением для окислителя. Подобные результаты получены и в работе [22], где КПД процесса кислородной конверсии попутного газа составил 85 %, а при использовании парокислородного дутья – 82 %.

Однако выбор и обоснование параметров процесса получения синтез-газа по результатам представленных расчетов не является однозначным, поскольку не обеспечивается равенство производственных эффектов по количеству и качеству образующегося синтез-газа. В таком случае необходимо вводить в рассмотрение системный (приведенный) эксергетический КПД, который по аналогии с [23] представлен в виде

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{np}} = \frac{Ex_{\text{cr}}^{\text{np}}}{\left( G_{\text{r}} \cdot ex_{\text{r}} + G_{\text{H}_2\text{O}} \cdot ex_{\text{H}_2\text{O}} + \right.} \quad (5)$$

$$\left. + G_{\text{ок}} \cdot ex_{\text{ок}} + Ex_{\text{H}_2} \pm Ex_{\text{CO}} \right)$$

где  $Ex_{\text{cr}}^{\text{np}} = Ex_{\text{cr}} \pm Ex_{\text{H}_2} \pm Ex_{\text{CO}}$  – приведённая эксергия синтез-газа базового варианта, соответствующего максимальной выработке водорода и оксида углерода, кВт;  $Ex_{\text{H}_2} = \Delta V_{\text{H}_2} \cdot ex_{\text{H}_2}$  и  $Ex_{\text{CO}} = \Delta V_{\text{CO}} \cdot ex_{\text{CO}}$  – эксер-



**Рис. 5.** Зависимость приведённого эксергетического КПД реактора частичного окисления при  $g=0$  кг пара/кг конденсата (а),  $g=3$  кг пара/кг конденсата (б) и  $g=6$  кг пара/кг конденсата (в) от давления в реакторе частичного окисления: 1 –  $C_{O_2}=21\%$ ; 2 –  $C_{O_2}=46\%$ ; 3 –  $C_{O_2}=71\%$ ; 4 –  $C_{O_2}=96\%$

**Fig. 5.** Dependence of the reduced exergy efficiency of the partial oxidation reactor at  $g=0$  kg of vapor/kg of condensate (a),  $g=3$  kg of vapor/kg of condensate (b) and  $g=6$  kg of vapor/kg of condensate (c) on pressure in the partial oxidation reactor: 1)  $C_{O_2}=21\%$ ; 2)  $C_{O_2}=46\%$ ; 3)  $C_{O_2}=71\%$ ; 4)  $C_{O_2}=96\%$

В качестве базового варианта примем в расчетах максимальную выработку водорода в рассмотренном диапазоне изменения влияющих параметров на уровне  $2,154 \text{ м}^3/\text{с}$ , а диоксида углерода –  $1,372 \text{ м}^3/\text{с}$ . Результаты расчета приведенного системного эксергетического КПД по выражению (5) при  $ex_{H_2}=118\,500 \text{ кДж/кг}$  и  $ex_{CO}=9202,2 \text{ кДж/м}^3$  [24] представлены на рис. 5.

Таким образом, качественные результаты и выводы, полученные при анализе вариантов тепловых схем энергохимических установок с применением эксергетического КПД подтверждаются выполненными расчетами системного приведенного КПД (рис. 5).

#### Заключение

Состав синтез-газа и его расход зависят от концентрации кислорода в дутьевом воздухе, от подачи дутьевого водяного пара и коэффициента расхода воздуха в РЧО.

Установлено что максимальные значения термодинамической эффективности преобразования газового конденсата в синтез-газ с применением технологий парциального окисления достигаются при использовании атмосферного воздуха без обогащения кислородом, как для случая с подачей водяного пара, так и для случая без его подачи. При этом некоторые варианты тепловых схем энергохимических установок с газификацией топлива в термодинамическом плане могут считаться равноэффективными, а решение по количеству подаваемого водяного пара в зону реакции должно соответствовать требованиям к синтез-газу.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-79-10036).

гия целевых компонентов синтез-газа, разница в выработке которых покрывается за счет замещающей альтернативной установки, кВт;  $\Delta V_{H_2}$  и  $\Delta V_{CO}$  – невязка материального баланса по целевым компонентам синтез-газа,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $ex_{H_2}$  и  $ex_{CO}$  – затраты эксергии на получение единицы компонента синтез-газа на самом совершенном производстве (химическая эксергия вещества),  $\text{кДж/м}^3$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A converter for producing a hydrogen-containing synthesis gas / Y.P. Malkov, O.N. Molchanov, B.K. Britov, I.A. Fedorov // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2016. – V. 89. – № 6. – P. 1545–1553.
2. Pashchenko D. Thermodynamic equilibrium analysis of combined dry and steam reforming of propane for thermochemical waste-heat recuperation // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – V. 42. – № 22. – P. 14926–14935.
3. Моделирование энергосберегающих промышленных установок с термодинамической регенерацией / А.Б. Гаряев, В.С. Глазов, С.В. Жубрин, С.К. Попов // *Вестник МЭИ*. – 2017. – № 4. – С. 15–22.
4. Долотовский И.В., Ларин Е.А., Долотовская Н.В. Системный анализ энергетического комплекса предприятий подготовки и переработки газа. – Саратов: Буква, 2014. – 326 с.
5. The chemical energy unit partial oxidation reactor operation simulation modeling / A.N. Mrakin, A.A. Selivanov, P.A. Batrakov, D.G. Sotnikov // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. – 2017. – № 944. – 012082. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012082.
6. Симонов В.Ф. Повышение эффективности энергоиспользования в нефтехимических производствах. – М.: Химия, 1985. – 240 с.
7. Badami M., Mura M. Exergetic analysis of an innovative small scale combined cycle cogeneration system // *Energy*. – 2010. – V. 35. – № 6. – P. 2535–2543.
8. Rosen M.A. Energy- and exergy-based comparison of coal-fired and nuclear steam power plants // *Exergy*. – 2001. – V. 1. – № 3. – P. 180–192.
9. Liao C., Ertesvag I.S., Zhao J. Energetic and exergetic efficiencies of coal-fired CHP (combined heat and power) plants used in district heating systems in China // *Energy*. – 2013. – V. 57. – P. 671–681.
10. Ozkan D., Kiziler O., Bilge D. Exergy analysis of a cogeneration plant // *Engineering and Technology*. – 2012. – V. 61. – P. 774–778.
11. Shabbar S., Janajreh I. Thermodynamic equilibrium analysis of coal gasification using Gibbs energy minimization method // *Energy Conversion and Management*. – 2013. – V. 65. – P. 755–763.
12. Afanasyeva O.V., Mingaleeva G.R. Comprehensive exergy analysis of the efficiency of a low-capacity power plant with coal gasification and obtaining sulfur // *Energy Efficiency*. – 2014. – V. 8. – № 2. – P. 255–265.
13. Afanas'yeva O.V., Mingaleeva G.R. Exergy efficiency of small coal-fired power plants as a criterion of their wide applicability // *Solid Fuel Chemistry*. – 2009. – V. 43. – № 1. – P. 55–59.
14. Prins M.J. Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2005. – 160 p.
15. Эксергетические расчеты технических систем: справ. пособие / под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского. – Киев: Наукова думка, 1991. – 360 с.
16. Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К. Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
17. Мракин А.Н., Сотников Д.Г., Селиванов А.А. Построение расчетной модели определения геометрических размеров реактора частичного окисления топлива // *Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: сб. науч. тр. Вып. 8. Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов: материалы XIII Междунар. научно-техн. конф.* – Саратов: ИП Беглакова Е.С., 2016. – С. 318–322.
18. Имитационное моделирование работы реактора частичного окисления энергохимической установки / А.Н. Мракин, А.А. Селиванов, П.А. Батраков, Д.Г. Сотников // *Динамика систем, механизмов и машин*. – 2017. – Т. 5. – № 2. – С. 83–90.
19. СТО Газпром 089–2010. Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия. – М: ОАО «Газпром», 2010. – 15 с.
20. Хлебалин Ю.М. Эксергетический метод оценки эффективности бинарных ПГУ-ТЭЦ // *Вестник СГТУ*. – 2011. – № 1 (54). – Вып. 3. – С. 14–17.
21. Свит Т.Ф. Основы разделения воздуха методом глубокого охлаждения и ректификации. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та им. И.И. Ползунова, 2005. – 132 с.
22. Производство технологического газа для синтеза аммиака и метанола из углеводородных газов / А.Г. Лейбуш, В.П. Семенов, Я.С. Казарновский, Н.В. Кархов. – М.: Химия, 1971. – 288 с.
23. Mrakin A.N., Akimova G.A. Complex analysis of the efficiency of plants for the thermochemical conversion of solid fuel // *Solid Fuel Chemistry*. – 2015. – V. 49. – № 4. – P. 261–265.
24. Степанов В.С. Химическая энергия и эксергия веществ. – Новосибирск: Наука, 1990. – 163 с.

Поступила 01.02.2018 г.

## Информация об авторах

**Мракин А.Н.**, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплотехники Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Николаев Ю.Е.**, доктор технических наук, профессор кафедры тепловой и атомной энергетики Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Сотников Д.Г.**, аспирант кафедры промышленной теплотехники Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

**Табакаев Р.Б.**, кандидат технических наук, научный сотрудник кафедры парогенераторостроения и парогенераторных установок Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Селиванов А.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплотехники Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

UDC 662.7

## DETERMINATION OF THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF PARTIAL OXIDATION REACTORS OF ENERGY-CHEMICAL INSTALLATIONS

**Anton N. Mrakin<sup>1</sup>,**  
anton1987.87@mail.ru

**Yury E. Nikolaev<sup>1</sup>,**  
niko00949@mail.ru

**Dmitry G. Sotnikov<sup>1</sup>,**  
sotnikovdg@gazprommash.ru

**Roman B. Tabakaev<sup>2</sup>,**  
TabakaevRB@tpu.ru

**Alexey A. Selivanov<sup>1</sup>,**  
selivanovaasstu@mail.ru

<sup>1</sup> Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.,  
77, Polytechnic street, Saratov, 410054, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to increase energy efficiency when using hydrocarbons for combined production of chemical products and energy carriers applying gasification technologies. This will allow reducing production costs and expanding the possibilities of gas chemistry.

**The main aim** of the research is to determine the thermodynamic efficiency of partial fuel oxidation reactors, being the part of energy-chemical plants, by the combined production of energy carriers and synthesis gas. The main attention is paid to the influence of the regime parameters on numerical value of the exergy efficiency.

**Object** of the research is a partial oxidation reactor with a set of auxiliary equipment for providing synthesis gas production. This takes into account the system factor, i. e. parameters of the power system within the framework of which it is planned to build a similar type of power plant.

**Method:** numerical experiment involving traditional approaches to compiling exergy balance of heat and power plants. The authors have used as well the mathematical models developed earlier by them for calculating the parameters of synthesis gas formed at processing hydrocarbon raw materials in flow-through autothermal non-catalytic reactors.

**Results.** The obtained results enable us to choose the most expedient operating parameters of the partial oxidation reactor, which is a part of the energy-chemical plants with the gasification of unstable gas condensate. So the maximum values of exergy efficiency are achieved by using atmospheric air without enrichment with oxygen, both for the case of water vapor supply ( $\eta_{ex}=78-83\%$ ), and for the case without steam supply ( $\eta_{ex}=82-88\%$ ). At the same time, some variants of thermal schemes of energy-chemical plants with fuel gasification in thermodynamic terms can be considered equally effective, and the decision on the amount of water vapor supplied to the reaction zone must meet the requirements for synthesis gas. The choice of working pressure level in the reactor requires additional studies since the evidence of the use of the atmospheric-type reactor is not revealed at this stage of the study.

**Key words:** Gas condensate, exergy, blowing steam, oxygen, gasification, reactor, synthesis gas, electricity.

*The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 17-79-10036).*

### REFERENCES

1. Malkov Y.P., Molchanov O.N., Britov B.K., Fedorov I.A. A converter for producing a hydrogen-containing synthesis gas. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 6, pp. 1545–1553.
2. Pashchenko D. Thermodynamic equilibrium analysis of combined dry and steam reforming of propane for thermochemical waste-heat recuperation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, no. 22, pp. 14926–14935.
3. Garyaev A.B., Glazov V.S., Zhubrin S.V., Popov S.K. Modeling of energy-saving industrial plants with thermochemical regeneration. *Vestnik MEI*, 2017, no. 4, pp. 15–22. In Rus.
4. Dolotovskiy I.V., Larin E.A., Dolotovskaya N.V. *Sistemnyy analiz energeticheskogo kompleksa predpriyatiy podgotovki i pererabotki gaza* [System analysis of the energy complex of gas preparation and processing enterprises]. Saratov, Bukva Publ., 2014. 326 p.
5. Mrakin A.N., Selivanov A.A., Batrakov P.A., Sotnikov D.G. The chemical energy unit partial oxidation reactor operation simulation modeling. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, 2017, no. 944, 012082. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012082.
6. Simonov V.F. *Povyshenie effektivnosti energospolzovaniya v neftekhimicheskikh proizvodstvakh* [Increasing the efficiency of energy use in petrochemical industries]. Moscow, Khimiya Publ., 1985. 240 p.
7. Badami M., Mura M. Exergetic analysis of an innovative small scale combined cycle cogeneration system. *Energy*, 2010, vol. 35, no. 6, pp. 2535–2543.
8. Rosen M.A. Energy- and exergy-based comparison of coal-fired and nuclear steam power plants. *Exergy*, 2001, vol. 1, no. 3, pp. 180–192.

9. Liao C., Ertesvag I.S., Zhao J. Energetic and exergetic efficiencies of coal-fired CHP (combined heat and power) plants used in district heating systems in China. *Energy*, 2013, vol. 57, pp. 671–681.
10. Ozkan D., Kiziler O., Bilge D. Exergy analysis of a cogeneration plant. *Engineering and Technology*, 2012, vol. 61, pp. 774–778.
11. Shabbar S., Janajreh I. Thermodynamic equilibrium analysis of coal gasification using Gibbs energy minimization method. *Energy Conversion and Management*, 2013, vol. 65, pp. 755–763.
12. Afanasyeva O.V., Mingaleeva G.R. Comprehensive exergy analysis of the efficiency of a low-capacity power plant with coal gasification and obtaining sulfur. *Energy Efficiency*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 255–265.
13. Afanas'yeva O.V., Mingaleeva G.R. Exergy efficiency of small coal-fired power plants as a criterion of their wide applicability. *Solid Fuel Chemistry*, 2009, vol. 43, no. 1, pp. 55–59.
14. Prins M.J. *Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction*. Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, 2005. 160 p.
15. *Eksergeticheskiye raschety tekhnicheskikh sistem: spravochnoe posobiye* [Exergetic calculations of technical systems: reference book]. Ed. by A.A. Dolinsky, V.M. Brodyanskiy. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1991. 360 p.
16. Brodyanskiy V.M., Fratsher V., Mikhalek K. *Eksergeticheskiy metod i ego prilozheniya* [The exergy method and its applications]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 288 p.
17. Mrakin A.N., Sotnikov D.G., Selivanov A.A. Postroeniye raschetnoy modeli opredeleniya geometricheskikh razmerov reaktora chastichnogo okisleniya topliva [Construction of a calculation model for determining the geometric dimensions of a partial fuel oxidation reactor]. *Problemy sovershenstvovaniya toplivno-energeticheskogo kompleksa: sbornik nauchnykh trudov. Vyp. 8. Sovershenstvovanie energeticheskikh sistem i teploenergeticheskikh kompleksov: materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Problems of improving the fuel and energy complex: coll. sci. tr. Iss. 8. Perfection of power systems and heat-and-power complexes: Materials of XIII Intern. scientific and technical. conf.]. Saratov, IP Beglakova E.S. Publ., 2016. pp. 318–322.
18. Mrakin A.N., Selivanov A.A., Batrakov P.A., Sotnikov D.G. Simulation modeling of the partial oxidation reactor of an energy-chemical installation. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*, 2017, vol. 5, no. 2, pp. 83–90. In Rus.
19. STO Gazprom 089–2010. *Gaz goryuchiy prirodny, postavlyayemy i transportiruyemy po magistralnym gazoprovodam. Tekhnicheskiye usloviya* [Natural gas, supplied and transported through main gas pipelines. Technical conditions]. Moscow, OAO Gazprom Publ., 2010. 15 p.
20. Khlebalin Yu.M. An exergetic method for estimating the efficiency of binary CCGT-TPPs. *Vestnik SGTU*, 2011, no. 1 (54), Iss. 3, pp. 14–17. In Rus.
21. Svit T.F. *Osnovy razdeleniya vozdukha metodom glubokogo okhlazhdeniya i rektifikatsii* [Fundamentals of air separation by deep cooling and rectification]. Barnaul, I.I. Polzunov Altay State Technical University Publ. house, 2005. 132 p.
22. Leybusch A.G., Semenov V.P., Kazarnovsky Ya.S., Karkhov N.V. *Proizvodstvo tekhnologicheskogo gaza dlya sinteza ammiaka i metanola iz uglevodorodnykh gazov* [Production of process gas for synthesis of ammonia and methanol from hydrocarbon gases]. Moscow, Khimiya Publ., 1971. 288 p.
23. Mrakin A.N., Akimova G.A. Complex analysis of the efficiency of plants for the thermochemical conversion of solid fuel. *Solid Fuel Chemistry*, 2015, vol. 49, no. 4, pp. 261–265.
24. Stepanov V.S. *Khimicheskaya energiya i eksergiya veshchestv* [Chemical energy and exergy of substances]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 163 p.

*Received: 1 February 2018.*

#### Information about the authors

**Anton N. Mrakin**, Cand. Sc., associate professor, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

**Yury E. Nikolaev**, Dr. Sc., professor, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

**Dmitry G. Sotnikov**, post-graduate student, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

**Roman B. Tabakaev**, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University

**Alexey A. Selivanov**, Cand. Sc., associate professor, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.

УДК 665.613.24:665.6.033.28

## СТРУКТУРА АСФАЛЬТЕНОВ НЕФТЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

Чешкова Татьяна Викторовна<sup>1</sup>,  
chtv12@mail.ru

Сергун Валерий Петрович<sup>1</sup>,  
sergun@ipc.tsc.ru

Коваленко Елена Юрьевна<sup>1</sup>,  
azot@ipc.tsc.ru

Сагаченко Татьяна Анатольевна<sup>1</sup>,  
dissovet@ipc.tsc.ru

Мин Раиса Сергеевна<sup>1</sup>,  
lgosn@ipc.tsc.ru

<sup>1</sup> Институт химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук,  
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью получения и обобщения информации о составе и строении асфальтеновых компонентов нефтей различной химической природы, так как особенности структурных характеристик асфальтенов оказывают существенное влияние на глубину их термодеструкции. Особое значение работы в этом направлении получили в последнее время из-за неуклонного роста в составе разведанных и извлекаемых запасов тяжелых нефтей, которые отличаются от традиционных нефтей высоким содержанием асфальтенов.

**Цель работы:** сравнительный анализ структурно-группового состава асфальтенов типичной метано-нафтеновой нефти и тяжелой нефти нафтено-ароматического основания, молекулярного состава структурных фрагментов, связанных в молекулах их асфальтеновых компонентов через сульфидные и эфирные мостики, и ковалентно несвязанных соединений.

**Методы исследования:** элементный анализ, криоскопия в бензоле, экстракция, жидкостно-адсорбционная хроматография, селективная химическая деструкция сульфидных и эфирных связей, ЯМР <sup>1</sup>H-спектроскопия, структурно-групповой анализ, хромато-масс-спектрометрия.

**Результаты.** Проведен сравнительный анализ состава и структуры асфальтеновых компонентов нефтей метано-нафтенового и нафтено-ароматического типов. Выявлены сходства и различия в их структурно-групповом составе, составе фрагментов, связанных в молекулах асфальтенов через эфирные и сульфидные мостики, и составе соединений, окклюдированных макромолекулами асфальтеновых веществ. С использованием методов мягкой химической деструкции сульфидных и эфирных связей показано, что наиболее распространенными фрагментами макромолекул асфальтенов нефтей метано-нафтенового и нафтено-ароматического типов являются n-алканы, циклогексаны, стераны, гопаны, n-алкилбензолы и n-алкилтолуолы. Особенностью молекул асфальтенов метано-нафтеновой нефти является присутствие в составе их структурных фрагментов алкенов, непредельных стеранов, а нафтено-ароматической нефти – прегнанов, хейлтанов, тιοфеновых соединений и этиловых эфиров алкановых кислот.

### Ключевые слова:

Нефть, асфальтены, структурно-групповой состав, селективная химическая деструкция, серо- и эфирсвязанные фрагменты, состав, насыщенные и ароматические углеводороды, гетероорганические соединения.

### Введение

Информация о строении асфальтенов нефтяных дисперсных систем (НДС) играет значительную роль при решении ряда фундаментальных и прикладных задач, связанных с генезисом нефтей, их добычей, транспортировкой и переработкой [1–6]. Несмотря на большой объем работ по асфальтеновым веществам, химическая природа этих компонентов изучена недостаточно, что во многом обусловлено чрезвычайной сложностью строения асфальтенов, представляющих собой непрерывный ряд соединений с различной молекулярной массой, полярностью и растворимостью [7–13]. В отличие от остальных компонентов нефти, асфальтены более склонны к образованию молекулярных ассоциатов в виде коллоидных частиц

значительных размеров. В составе таких частиц собственно асфальтеновые молекулы образуют ядра, на поверхности которых адсорбируются молекулы гетероатомных и углеводородных компонентов нефтяных дистиллятов [14, 15]. Формирование асфальтеновых агрегатов различных иерархических уровней неразрывно связано с составом и строением асфальтеновых молекул, а соотношение этих уровней оказывает влияние на физико-химические свойства НДС [16–21]. В связи с этим накопление информации об особенностях состава, структуры и свойств асфальтеновых веществ нефтей различных химических типов является важной и актуальной задачей. Особое значение работы в этом направлении получили в последнее время из-за неуклонного роста в составе разведанных и

извлекаемых запасов тяжелых нефтей, которые отличаются от традиционных нефтей высоким содержанием асфальтенов.

В рамках данного сообщения обобщены полученные авторами экспериментальные данные о составе и структуре асфальтеновых компонентов типичной нефти метано-нафтенового основания [22] и тяжелой нефти нафтено-ароматического типа [23–25].

#### Экспериментальная часть

Объекты исследования – асфальтены нефтей промышленно разрабатываемых месторождений Крапивинское (Западная Сибирь, терригенные отложения, верхнеюрская залежь [26]) и Усинское (Республика Коми, карбонатные отложения, пермо-карбонная залежь [27]) (табл. 1).

**Таблица 1.** Характеристика объектов исследования

**Table 1.** Properties of the objects under study

Месторождение Oilfield	Тип нефти Oil type	Плотность, кг/м <sup>3</sup> Density, kg/m <sup>3</sup>	Содержание, % мас. Content, wt. %			
			N	S	Асфальтены Asphaltenes	Смолы Resins
Крапивинское Krapivinsk	метано-нафтеновая methane-naphthenic	867	0,35	1,05	2,6	8,8
Усинское Usinsk	нафтено-ароматическая naphthene-aromatic	1008	0,62	2,04	11,2	19,1

Подготовка образцов к анализу включала стадии разделения асфальтенов на высоко- (ВМА) и низкомолекулярные (НМА) компоненты и соединения, адсорбированные/окклюдируемые их молекулами – «мальтены» [21, 28], и хроматографического разделения «мальтенов» на фракции относительно малополярных (фракция А) и полярных соединений (фракция В), элюируемых смесью гексана с бензолом (1:1 по объему) и метанола с хлороформом (1:4 по объему).

Для характеристики полученных продуктов использовали комплекс физико-химических методов: определение элементного состава (С, Н, N, S – на анализаторе «Vario EL Cube», О – по разности между 100 % и содержанием элементов С, Н, N, S), измерение средних молекулярных масс (ММ) методом криоскопии в бензоле, селективную химическую деструкцию [22, 25, 28], ЯМР-Фурье спектроскопию, структурно-групповой анализ (СГА) [29], хроматомасс-спектрометрию (ГХ-МС).

Спектры ЯМР <sup>1</sup>H записывали на ЯМР-Фурье спектрометре «AVANCE AV 300» фирмы «Bruker» при 300 МГц в растворах CDCl<sub>3</sub>. В качестве стандарта использовали тетраметилсилан. По спектрам ЯМР <sup>1</sup>H проводили расчет относительного содержания протонов в различных структурных фрагментах, исходя из площадей сигналов в соот-

ветствующих областях спектра:  $H_{ar}$  (доля протонов, содержащихся в ароматических структурах) – 6,6–8,5 м.д.;  $H_{\alpha}$  (доля протонов у атомов углерода в  $\alpha$ -положении к ароматическим ядрам) – 2,2–4,0 м.д.;  $H_{\beta}$  и  $H_{\gamma}$  (доля протонов в метиленовых и в концевых метильных группах алифатических фрагментов молекул, соответственно) – 1,1–2,1 и 0,3–1,1 м.д. [30].

Метод СГА использовали для описания молекулярной структуры ВМА. На основе данных о ММ, элементном составе и распределении протонов между различными фрагментами их молекул рассчитывали средние структурные характеристики молекул исследуемых веществ [29]. В ходе расчетов определены следующие параметры:  $C_a$ ,  $C_n$ ,  $C_{\pi}$  – число углеродных атомов в ароматических, нафтеновых и парафиновых структурах средней молекулы соответственно;  $m_a$  – число структурных единиц в средней молекуле;  $K_o^*$ ,  $K_a^*$ ,  $K_n^*$  – общее число, число ароматических и нафтеновых циклов в парафиновой единице;  $C_n^*$  – число атомов углерода в парафиновых фрагментах структурной единицы,  $C_{\alpha}^*$  и  $C_{\gamma}^*$  – количество атомов С, находящихся в  $\alpha$ -положении к ароматическим ядрам и в не связанных с ароматическими ядрами терминальных метильных группах.

Разрыв эфирных и сульфидных связей в молекулах асфальтенов осуществляли с помощью трибромид бора и борид никеля, соответственно. Условия проведения селективных реакций описаны в [22, 25].

ГХ-МС анализ жидких продуктов хемоллиза и малополярной фракции А «мальтенов» проводили на приборе DFS фирмы «Thermo Scientific». Условия получения спектров, их обработки и подходы к идентификации соединений приведены в работе [24].

Анализ образцов осуществляли с привлечением оборудования центра коллективного пользования Томского научного центра СО РАН.

#### Результаты и их обсуждение

Анализ результатов фракционирования исследуемых асфальтенов показал, что, независимо от типа нефти, они имеют сходный характер распределения соединений по ММ. Основной вклад в состав асфальтеновых компонентов вносят ВМА (ММ 1009 и 1500 а.е.м. для нефтей метано-нафтенового и нафтено-ароматического типов). Доля НМА (ММ 550 и 770 а.е.м.) и «мальтенов» (ММ 500 и 700 а.е.м.) значительно ниже. Нафтено-ароматическая нефть отличается от метано-нафтеновой нефти повышенным содержанием ВМА (92,2 против 87,1 % отн.). Особенностью метано-нафтеновой нефти является более высокое содержание НМА (5,4 против 3,7 % отн.) и почти в два раза большее содержание «мальтенов» (6,7 против 3,4 % отн.). Наиболее отличающиеся по выходу фракции асфальтенов (ВМА, «мальтены») были использованы для сравнительной характеристики асфальтеновых компонентов нефтей различной природы.

Сравнительная характеристика высокомолекулярных асфальтенов

Анализ результатов СГА (табл. 2) позволил оценить величину и строение молекул основной массы асфальтеновых веществ метано-нафтеновой и нафтено-ароматической нефтей и выявить сходства и различия в их структуре.

Установлено, что средние молекулы ВМА тяжелой нафтено-ароматической нефти отличаются от средних молекул ВМА типичной нефти метано-нафтенового типа большими значениями ММ (1500 против 1009 а.е.м.), большим количеством углеродных атомов в ароматических ( $C_a$  43,94 против 23,23) и нафтеновых ( $C_n$  49,97 против 43,31) фрагментах и большим числом структурных единиц ( $m_a$  3,21 против 2,04). Однако в средних молекулах ВМА метано-нафтеновой нефти структурные единицы крупнее ( $C^*$  35,22 против 30,72), что обусловлено большим развитием нафтеновых ( $K_n^*$  8,67 против 3,98) и алифатических фрагментов ( $C_n^*$  2,60 против 1,48).

В то же время молекулы ВМА обоих типов нефтей и присутствующие в них структурные единицы мало различаются по характеру лежащих в их основе полициклических систем и природе алифатических фрагментов. Так, близкое к четырем значение параметра  $C_a^*$  (3,47 и 4,70) может свидетельствовать о размещении ароматических ядер на периферии нафтеноареновых структур, а равенство расчетных значений параметров  $C_n^*$  и  $C_\gamma^*$  – о том, что алкильные заместители в структурных единицах средних молекул обоих образцов представлены только метильными группами.

Из сравнения данных о содержании гетероатомов следует, что в средних молекулах ВМА метано-нафтеновой нефти 30 % структурных единиц содержат атом азота, 35 % структурных единиц – атом серы, а атом кислорода входит в структуру каждой структурной единицы. В случае нафтено-ароматической нефти атом азота содержат 38 % структурных единиц, атом серы – 50 % структурных единиц, и каждая структурная единица содержит от 2 до 3 атомов кислорода.

Повышенная концентрация в образцах ВМА серы и высокое содержание кислорода определили направление исследования структуры их молекул. Известно, что в молекулярной структуре асфальтенов важную роль играет сера в сульфидных связях, на долю которых может приходиться до 40 % общей серы асфальтеновых веществ, и кислород в эфирных и сложноэфирных связях [28]. Функциональные группы простых и/или сложных эфиров и алифатических сульфидов могут выступать в качестве мостиков, осуществляющих в молекулах асфальтенов связь отдельных структурных фрагментов между собой или с поликонденсированным ядром их молекул [28]. Наличие такой мостиковой связи установлено в молекулах асфальтенов Атабаски [28], асфальтенов и смол тяжелой нефти Усинского месторождения [25, 31] и смолисто-асфальтеновых и ма-

сляных компонентов асфальтинового битума [32, 33]. В связи с этим в работе уделено внимание сравнительной характеристике состава структурных фрагментов, связанных в молекулах исследуемых ВМА через эфирные и сульфидные мостики.

**Таблица 2.** Расчетные значения структурных параметров молекул ВМА метано-нафтеновой (1) и нафтено-ароматической (2) нефтей

**Table 2.** Calculated values of the structural parameters for (HMA) molecules in methane-naphthenic (1) and naphthenic-aromatic (2) oils

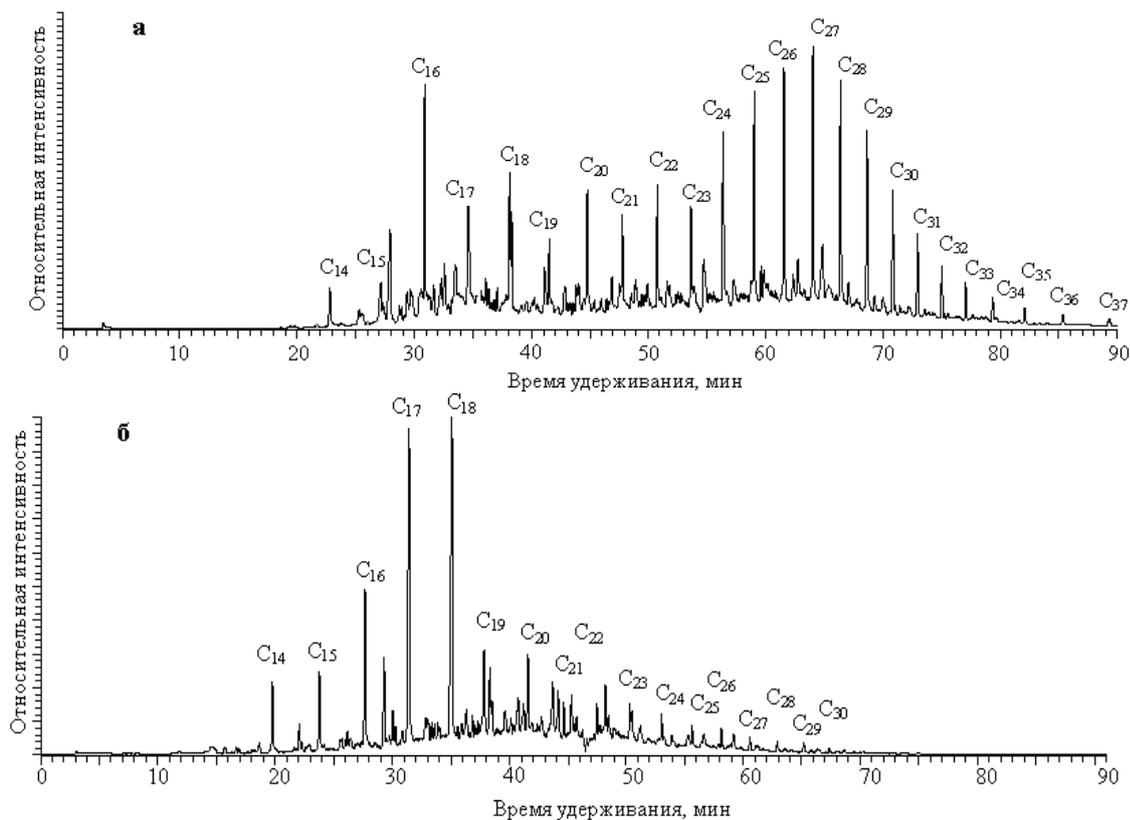
Параметры/Index		1	2	
Средняя молекулярная масса Average molecular mass		1009	1500	
Элементный состав, мас. % Elemental composition, wt. %	C	85,44	78,92	
	H	7,47	6,86	
	N	0,89	1,14	
	S	2,34	3,42	
	O	3,86	9,66	
Число атомов в средней молекуле Amount of atoms in an average molecule	C	71,84	96,65	
	H	74,77	102,08	
	N	0,64	1,22	
	S	0,74	1,60	
	O	2,43	9,06	
	$C_a$	23,23	43,94	
	$C_n$	43,31	49,97	
	$C_\alpha$	5,30	4,74	
Число структурных единиц в средней молекуле Number of structural units in the average molecule	$m_a$	2,04	3,21	
	Параметры средних структурных единиц Parameters of average structural unit	$K_o^*$	11,37	7,45
		$K_s^*$	2,69	3,47
		$K_n^*$	8,67	3,98
$C^*$		35,22	30,72	
$C_n^*$		2,60	1,48	
$C_a^*$		3,47	4,70	
$C_\gamma^*$		2,60	1,48	

\* – относится к структурной единице

\* – refers to a structural unit

Химическая деструкция алифатических связей C-S и C-O

Выход растворимых в гексане продуктов деструкции составляет 24,1 и 33,3 % для молекул ВМА метано-нафтеновой и нафтено-ароматической нефтей соответственно, что существенно выше, чем выход растворимых продуктов деструкции эфирных связей (12,8 и 9,6 %). Это может свидетельствовать о том, что в структуре ВМА исследуемых нефтей доля «серосвязанных» фрагментов выше доли фрагментов, содержащих эфирные связи. В то же время в структуре ВМА тяжелой нафтено-ароматической нефти выше доля фрагментов, связанных через сульфидные мостики, а в структуре ВМА типичной метано-нафтеновой нефти – через эфирные.



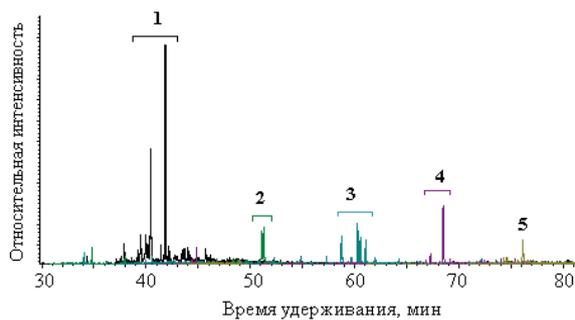
Цифры у C<sub>14</sub>–C<sub>37</sub> – количество атомов углерода  
 Index number C<sub>14</sub>–C<sub>37</sub> is the number of carbon atoms

**Рис. 1.** Масс-хроматограмма продуктов деструкции эфирных связей в молекулах ВМА метано-нафтеновой (а) и нафтено-ароматической (б) нефтей по иону с  $m/z$  71 (n-алканы)

**Fig. 1.** Mass-chromatogram for the products of ether bonds destruction in the HMA molecules of methane-naphthenic (a) and naphthenic-aromatic (b) oils at the ion with  $m/z$  71 (n-alkanes)

По данным ГХ-МС анализа в растворимых продуктах химической деструкции сульфидных и эфирных связей в молекулах ВМА нефтей обоих типов присутствуют алканы, нафтены, ароматические углеводороды (АУ) и гетероорганические соединения (ГОС) [22, 25]. При этом одни и те же представители «серосвязанных» и «эфиросвязанных» нафтенов и ароматических УВ в структуре молекул ВМА обеих нефтей имеют сходное распределение. Различия наблюдаются в молекулярном составе «связанных» n-алканов. В случае метано-нафтеновой нефти эти насыщенные фрагменты молекул ВМА характеризуются большим числом атомов углерода в цепи и положением максимума молекулярно-массового распределения: C<sub>27</sub> вместо C<sub>18</sub> (рис. 1).

Особенностью молекул ВМА метано-нафтеновой нефти является также присутствие в составе их «серосвязанных» фрагментов алкенов и непредельных стеранов и более широкого спектра полициклических АУ [22]. Среди последних, кроме би- и трициклических соединений, установлены тетра-, пента- и гексациклические структуры (рис. 2).



1-2, 3, 4-5 – тетра-, пента- и гексациклические ароматические углеводороды, соответственно  
 1-2, 3, 4-5 – tetra-, penta- and hexacyclic aromatic hydrocarbons, respectively

**Рис. 2.** Масс-хроматограмма продуктов деструкции сульфидных связей в молекулах ВМА метано-нафтеновой нефти по ионам с  $m/z$  202 (1), 228 (2), 252 (3), 276 (4) и 302 (5)

**Fig. 2.** Mass-chromatogram for the products of sulfide bonds destruction in the HMA molecules of methane-naphthenic oil at ions with  $m/z$  202 (1), 228 (2), 252 (3), 276 (4) and 302 (5)

Наблюдаются различия и в составе продуктов деструкции эфирных связей. Так, только среди «эфиросвязанных» фрагментов молекул ВМА тяжелой нафтено-ароматической нефти идентифицированы три- и тетрациклические терпаны и гомологические ряды алкилзамещенных тиофенов и этиловых эфиров алифатических кислот [25]. Присутствие алкилтиофенов в структуре асфальтенов установлено авторами [34] в продуктах термической деструкции асфальтеновых компонентов Атабаски. Что касается идентифицированных этиловых эфиров, то они, вероятнее всего, окклюдируются ВМА, так как хемоллиз может приводить не только к разрушению ковалентных связей, но и к высвобождению соединений, находящихся внутри асфальтеновых структур [35].

Наличие идентифицированных в структуре ВМА нефтей обоих типов нормальных алканов, циклогексанов, прегнанов и стеранов, хейлантанов и гопанов отмечено также в составе связанных фрагментов в молекулах ВМА асфальтенов Атабаски и нефтей Китая [28] и жидких продуктов термической деструкции асфальтеновых компонентов ивановского [36] и спиридоновского асфальтитов [37]. Это свидетельствует о том, что, независимо от типа НДС, перечисленные соединения являются неотъемлемой частью структурных фрагментов молекул асфальтенов. Различия в молекулярно-массовом распределении этих соединений отражают специфику строения молекул асфальтенов, связанную с геохимической историей нефтяных систем.

Следует также отметить, что структурные фрагменты, связанные в молекулах асфальтенов алифатическими связями С-S и С-O, которые характеризуются низкой термической стабильностью, будут присутствовать в составе светлых продуктов переработки исследованных нефтей. Этот факт необходимо учитывать при выборе технологических решений получения на их основе высококачественных нефтепродуктов.

#### Состав «мальтенов»

Согласно результатам хроматографического разделения, основную массу «мальтенов» в составе асфальтенов как типичной метано-нафтеновой, так и тяжелой нафтено-ароматической нефтей составляют полярные соединения фракций В (60,6 и 59,7 % соответственно), среди которых, по данным ИК-спектроскопии, присутствуют кислоты, амиды и сульфоксиды [22, 24].

Малополярные соединения фракций А «мальтенов» в обоих случаях представлены нормальными и разветвленными алканами, алкилциклопентанами, алкилциклогексанами, стеранами (C<sub>21</sub>–C<sub>22</sub> прегнанами, C<sub>27</sub>, C<sub>28</sub> диахолестанами, C<sub>27</sub>, C<sub>28</sub>, C<sub>29</sub> холестанами) и терпанами (хейлантанами от C<sub>23</sub> до C<sub>29</sub>, тетрациклическим терпаном C<sub>24</sub>, рядом гопанов от C<sub>27</sub> до C<sub>32</sub>), н-алкилбензолами, алкилтолуолами, алкилсилолами, нафталинами, фенантренами, бензо- и дибензотиофенами, дибензофурана-

ми, карбазолами и бензокарбазолами [22–24].

Особенностью «мальтенов» тяжелой нафтено-ароматической нефти является присутствие в их составе более широкого набора трициклических терпанов (хейлантанов) с максимумом на C<sub>23</sub> и пониженным относительным содержанием гомологов выше C<sub>26</sub> (рис. 3). Такой характер распределения этих УВ-биомаркеров может указывать на микробиологическую переработку исходного органического вещества данной нефти [38].

Существенные отличия наблюдаются и в составе АУ и ГОС «мальтенов» тяжелой нафтено-ароматической нефти. Так, среди моноаренов дополнительно идентифицированы фитанилбензолы, фенилалканы с различным положением фенильного заместителя в алкильной цепи и алкилтриметилбензолы, среди полициклических аренов – тетра- и пентациклические АУ, фенил- и нафтенозамещенные структуры. Среди ГОС «мальтенов» нафтено-ароматической нефти установлено присутствие нафтобензотиофенов, флуоренонов и этиловых эфиров высших жирных кислот. Ранее этиловые эфиры алифатических кислот были определены в составе «мальтенов» асфальтеновых агрегатов нефтей северо-запада Китая [39].

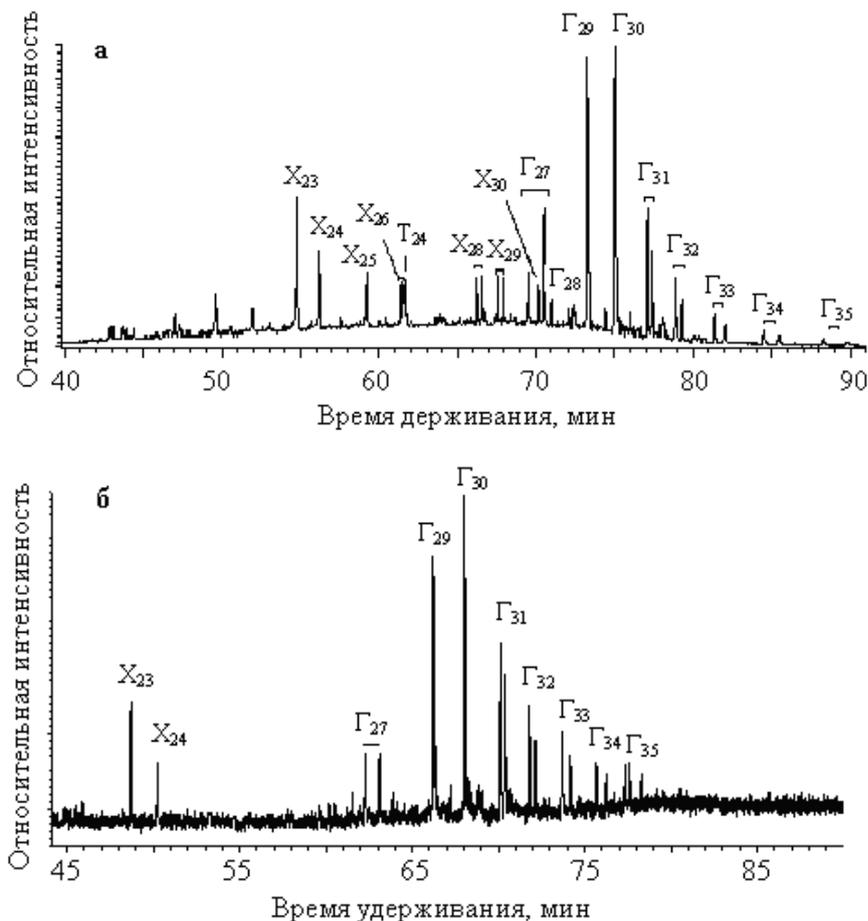
Отличительной особенностью «мальтенов» типичной метано-нафтеновой нефти является присутствие 1- и 2-алкенов с четным числом атомов углерода в цепи в составе УВ и более высокомолекулярных азоторганических соединений – дибензокарбазолов [22].

По литературным данным [40], окклюдируемые соединения – это продукты раннего преобразования керогена. Поэтому можно предположить, что присутствие идентифицированных соединений в составе «мальтенов» обусловлено их клатрацией с макромолекулярными образованиями асфальтенов, захватывающими эти соединения в полые ячейки своих структур.

#### Заключение

Из обобщения результатов проведенного исследования следует:

- независимо от химической природы нефтей, в составе их асфальтенов присутствуют ВМА, НМА и соединения, адсорбируемые и/или окклюдируемые молекулами асфальтеновых компонентов, – «мальтены». Основной вклад в состав асфальтеновых компонентов вносят ВМА. Тяжелая нафтено-ароматическая нефть отличается повышенным содержанием ВМА, типичная метано-нафтеновая нефть – более высоким содержанием НМА и почти в два раза большим содержанием «мальтенов»;
- средние молекулы ВМА тяжелой нафтено-ароматической нефти характеризуются более высокими значениями ММ, большим количеством атомов углерода в ароматических и нафтеновых фрагментах и большим числом структурных единиц. Особенностью средних молекул ВМА типичной метано-нафтеновой нефти



X – хейлантаны (трицикланы), T – тетрацикланы, Г – гопаны (пентацикланы)  
 Цифры у буквенных обозначений – количество атомов углерода  
 X – cheilanthanes (tricyclanes), T – tetracyclanes, Г – hopanes (pentacyclanes)  
 Index numbers are the number of carbon atoms

Рис. 3. Масс-хроматограмма фракции А «мальтенов» нафтено-ароматической (а) и метано-нафтеновой (б) нефтей по иону с  $m/z$  191

Fig. 3. Mass-chromatogram for A fraction of «petrolene» in naphthenic-aromatic (a) and methane-naphthenic (б) oils at the ion with  $m/z$  191

являются более крупные размеры структурных единиц, обусловленные большим развитием нафтеновых и алифатических фрагментов. Средние молекулы ВМА нефтей обоих типов богаты кислородом и серой, часть из которых участвует в образовании эфирных и сульфидных мостиков, связывающих в молекулах асфальтенов отдельные структурные фрагменты между собой или с поликонденсированным ядром;

- среди соединений, связанных в молекулах ВМА как эфирными, так и сульфидными мостиками, присутствуют н-алканы, алкилциклопентаны, алкилциклогексаны, стераны, терпаны, н-алкилбензолы и н-алкилтолуолы. Одни и те же представители «серосвязанных» и «эфиросвязанных» нафтенов и ароматических УВ в структуре молекул ВМА обеих нефтей имеют сходное распределение. «Связанные» н-алканы в случае типичной метано-нафтеновой нефти характеризуются большим числом ато-

мов углерода в цепи и сдвигом максимума распределения в высокомолекулярную область. Отличительной особенностью метано-нафтеновой нефти является также наличие в составе «серосвязанных» фрагментов н-алкенов и непредельных стеранов и более широкого спектра полициклических АУ;

- основную массу «мальтенов» в составе асфальтеновых компонентов и метано-нафтеновой и нафтено-ароматической нефтей составляют полярные соединения, в том числе кислоты, амиды и сульфоксиды, имеющие сложное строение. В составе малополярных соединений «мальтенов» установлены те же классы УВ, что и в составе «связанных» фрагментов. Особенностью «мальтенов» тяжелой нафтено-ароматической нефти является присутствие в их составе более широкого набора полициклических структур, в том числе трициклических терпанов, тетра- и пентациклических АУ, а также фенил- и нафтенопро-

изводных АУ, особенностью «мальтенов» типичной метано-нафтеновой нефти – присутствие в их составе n-алкенов и дибензокарбазолов.

Выявленные различия в составе и структуре изученных асфальтенов, вероятнее всего, связаны с условиями залегания продуктивных нефтяных залежей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Distribution Features of Biomarker Hydrocarbons in Asphaltene Thermolysis Products of Different Fractional Compositions (Using as an Example Oils from Carbonate Deposits of Tatarstan Oilfields) / G.N. Gordadze, M.V. Giruts, V.N. Koshelev, T.N. Yusupova // *Petroleum Chemistry*. – 2015. – V. 55. – № 1. – P. 22–31.
2. Pan Y.H., Liao Y.H., Sun Y.G. The Characteristics of Bound Biomarkers Released from Asphaltenes in a Sequence of Naturally Biodegraded Oils // *Organic Geochemistry*. – 2017. – V. 111. – P. 56–66.
3. Nanoaggregates of Diverse Asphaltenes by Mass Spectrometry and Molecular Dynamics / W.G. Wang, C. Taylor, H. Hu, K.L. Humphries, A. Jaini, M. Kitimet, T. Scott, Z. Stewart, K.J. Ulep, S. Houck, A. Luxon, B.Y. Zhang, B. Miller, C.A. Parish, A.E. Pomerantz, O.C. Mullins, R.N. Zare // *Energy and Fuels*. – 2017. – V. 31. – № 9. – P. 9140–9151.
4. Analysis of Asphaltene Instability Using Diffusive and Thermodynamic Models during Gas Charges into Oil Reservoirs / J.Y. Zuo, S. Pan, K. Wang, O.C. Mullins, H. Dumont, L. Chen, V. Mishra, J. Canas // *Energy and Fuels*. – 2017. – V. 31. – № 4. – P. 3717–3728.
5. Tracing the Compositional Changes of Asphaltenes after Hydroconversion and Thermal Cracking Processes by High-Resolution Mass Spectrometry / M.L. Chacon-Patino, C. Blanco-Tirado, J.A. Orrego-Ruiz, A. Gomez-Escudero, M.Y. Combariza // *Energy and Fuels*. – 2015. – V. 29. – № 10. – P. 6330–6341.
6. Structural Transformations of Asphaltenes during Hydroconversion of Vacuum Residue with Recycling the Hydroconversion Product Distillation Residue / Kh.M. Kadiev, O.V. Zaytseva, E.E. Magomadov, E.A. Chernysheva, N.V. Oknina, A.E. Batov, M.Kh. Kadieva, V.M. Kapustin, S.N. Khadzhiev // *Petroleum Chemistry*. – 2015. – V. 55. – № 6. – P. 487–496.
7. Unraveling the Molecular Structures of Asphaltenes by Atomic Force Microscopy / B. Schuler, G. Meyer, D. Pena, O.C. Mullins, L. Gross // *Journal of the American Chemical Society* – 2015. – V. 137. – № 31. – P. 9870–9876.
8. Review on Aggregation of Asphaltene vis-a-vis Spectroscopic Studies / A.K. Ghosh, P. Chaudhuri, B. Kumar, S.S. Panja // *Fuel*. – 2016. – V. 185. – P. 541–554.
9. Molecular Structure and Association Behavior of Petroleum Asphaltene / Z.T. Chen, L.H. Zhang, S.Q. Zhao, Q. Shi, C.M. Xu // *Structure and Bonding*. – 2016. – V. 168. – P. 1–38.
10. Laser-Based Mass Spectrometric Assessment of Asphaltene Molecular Weight, Molecular Architecture, and Nanoaggregate Number / A.E. Pomerantz, Q.H. Wu, O.C. Mullins, R.N. Zare // *Energy and Fuels*. – 2015. – V. 29. – № 5. – P. 2833–2842.
11. Evdokimov I.N., Fesan A.A., Losev A.P. New Answers to the Optical Interrogation of Asphaltenes: Monomers and Primary Aggregates from Steady-State Fluorescence Studies // *Energy and Fuels*. – 2016. – V. 30. – № 6. – P. 4494–4503.
12. Changes in Asphaltene Structure during Thermal Cracking of Residual Oils: XRD Study / F.S. AlHumaidan, A. Hauser, M.S. Rana, H.M.S. Lababidi, M. Behbehani // *Fuel*. – 2015. – V. 150. – P. 558–564.
13. Chacon-Patino M.L., Rowland S.M., Rodgers R.P. Advances in Asphaltene Petrochemics. Part 1: Asphaltenes are Composed of Abundant Island and Archipelago Structural Motifs // *Energy and Fuels*. – 2017. – V. 31. – № 12. – P. 13509–13518.
14. Exploring Occluded Compounds and their Interactions with Asphaltene Networks Using High-Resolution Mass Spectrometry / M.L. Chacon-Patino, S.J. Vesga-Martinez, C. Blanco-Tirado, J.A. Orrego-Ruiz, A. Gomez-Escudero, M.Y. Combariza // *Energy and Fuels*. – 2016. – V. 30. – № 6. – P. 4550–4561.
15. Geochemical Evolution of Occluded Hydrocarbons inside Geomacromolecules: a Review / B. Cheng, J. Zhao, C.P. Yang, Y.K. Tian, Z.W. Liao // *Energy and Fuels*. – 2017. – V. 31. – № 9. – P. 8823–8832.
16. Toward the Asphaltene Structure by Electron Paramagnetic Resonance Relaxation Studies at High Fields (3.4 T) / G.V. Mamin, M.R. Gafurov, R.V. Yusupov, I.N. Gracheva, Yu.M. Ganeeva, T.N. Yusupova, S.B. Orlinskii // *Energy and Fuels*. – 2016. – V. 30. – № 9. – P. 6942–6946.
17. Influence of Resins and Asphaltenes on the Structural and Rheological Properties of Petroleum Disperse Systems / D.V. Nelyubov, L.P. Semikhina, D.A. Vazhenin, I.A. Merkul'ev // *Petroleum Chemistry*. – 2017. – V. 57. – № 3. – P. 203–208.
18. Sjoblom J., Simon S., Xu Z.H. Model Molecules Mimicking Asphaltenes // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2015. – V. 218. – P. 1–16.
19. Rogel E., Moir M. Effect of Precipitation Time and Solvent Power on Asphaltene Characteristics // *Fuel*. – 2017. – V. 208. – P. 271–280.
20. Torkaman M., Bahrami M., Dehghani M. Influence of Temperature on Aggregation and Stability of Asphaltenes. I. Perikinetic Aggregation // *Energy and Fuels*. – 2017. – V. 31. – № 10. – P. 11169–11180.
21. Molina D., Leon E.A., Chaves-Guerrero A. Understanding the Effect of Chemical Structure of Asphaltenes on Wax Crystallization of Crude Oils from Colorado Oil Field // *Energy and Fuels*. – 2017. – V. 31. – № 9. – P. 8997–9005.
22. Химический состав нефти Крапивинского месторождения (сообщение 3) / В.П. Сергун, Т.В. Чешкова, Т.А. Сагаченко, Р.С. Мин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 7. – С. 59–66.
23. Characteristic Structural Features of Asphaltene Macromolecules in Heavy Crude Oil from the Usinsk Field / E.Yu. Kovalenko, V.P. Sergun, R.S. Min, T.A. Sagachenko // *Chemistry and technology of fuels and oils*. – 2014. – V. 49. – № 6. – P. 522–531.
24. Low-Molecular-Mass Asphaltene Compounds from Usa Heavy Oil / V.P. Sergun, E.Yu. Kovalenko, T.A. Sagachenko, R.S. Min // *Petroleum Chemistry*. – 2014. – V. 54. – № 2. – P. 83–87.
25. Structural Units with Sulfur and Ether/Ester Bonds in Molecules of High- and Low-Molecular-Weight Asphaltenes of Usa Heavy Oil / V.P. Sergun, T.V. Cheshkova, T.A. Sagachenko, R.S. Min // *Petroleum Chemistry*. – 2016. – V. 56. – № 1. – P. 10–15.
26. Химический состав нефти Крапивинского месторождения (сообщение 1) / А.Э. Торломоева, Т.В. Чешкова, Е.Ю. Коваленко, Т.А. Сагаченко // *Известия Томского политехнического университета*. – 2015. – Т. 326. – № 2. – С. 48–55.
27. Physical-chemical and complex EOR/IOR technologies for the Permian-Carboniferous deposit of heavy oil of the Usinskoye oil field / L.K. Altunina, V.A. Kuvshinov, I.V. Kuvshinov, L.A. Sta-

- syeva, M.V. Chertenkov, L.S. Shkrabyuk, D.V. Andreev // *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*. – 2017. – № 7. – P. 26–29.
28. Molecular Structure of Athabasca Asphaltene: Sulfide, Ether, and Ester Linkages / P. Peng, A. Morales-Izquierdo, A. Hogg, O.P. Strausz // *Energy and Fuels*. – 1997. – V. 11. – № 5. – P. 1171–1187.
29. Golovko A.K., Kam'yanov V.F., Ogorodnikov V.D. High-Molecular Heteroatomic Components of Crude Oils of the Timan-Pechora Petroliferous Basin // *Russian Geology and Geophysics*. – 2012. – V. 53. – № 12. – P. 1374–1381.
30. Smirnov M.B., Poludetkina E.N., Vanyukova N.A. Unsaturated Hydrocarbons of Thermocatalytic Origin in Some Oils and Bitumens from the Southern Part of Anadyr Basin // *Petroleum Chemistry*. – 2010. – V. 50. – № 3. – P. 189–199.
31. Composition and Structure of Resinous Components of Heavy Oil from the Usa Oilfield / T.V. Cheshkova, E.Yu. Kovalenko, N.N. Gerasimova, T.A. Sagachenko, R.S. Min // *Petroleum Chemistry*. – 2017. – V. 57. – № 1. – P. 31–38.
32. Chemical Nature of the Oil and Tarry-Asphaltene Components of Natural Bitumen from the Ashal'chinsk Deposit in Tatarstan / T.A. Sagachenko, V.P. Sergun, T.V. Cheshkova, E.Y. Kovalenko, R.S. Min // *Solid Fuel Chemistry*. – 2015. – V. 49. – № 6. – P. 349–355.
33. Антипенко В.Р., Чешкова Т.В. Состав соединений, связанных через эфирные и сульфидные мостики в маслах природного битума Ашальчинского месторождения // *Известия Томского политехнического университета*. – 2014. – Т. 324. – № 3. – С. 16–21.
34. Payzant J.D., Lown E.M., Strausz O.P. Structural Units of Athabasca Asphaltene – the Aromatics with a Linear Carbon Framework // *Energy and Fuels*. – 1991. – V. 5. – № 3. – P. 445–453.
35. The Organic Geochemistry of Asphaltenes and Occluded Biomarkers / L.R. Snowdon, J.K. Volkman, Z.R. Zhang, G.L. Tao, P. Liu // *Organic Geochemistry*. – 2016. – V. 91. – P. 3–15.
36. Антипенко В.Р. Термические превращения высокосернистого природного асфальтита: геохимические и технологические аспекты. – Новосибирск: Наука РАН, 2013. – 184 с.
37. Characteristic Features of the Hydrocarbon Composition of Spiridonovskoe (Tatarstan) and Pitch Lake (Trinidad and Tobago) Asphaltites / G.P. Kayukova, B.V. Uspensky, I.M. Abdrafikova, R.Z. Musin // *Petroleum Chemistry*. – 2016. – V. 56. – № 7. – P. 572–579.
38. Гордадзе Г.Н. Углеводороды в нефтяной геохимии. Теория и практика. – М.: Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, 2015. – 559 с.
39. Thermal Evolution of Adsorbed/Occluded Hydrocarbons inside Kerogens and its Significance as Exemplified by One Low-Matured Kerogen from Santanghu Basin, Northwest China / B. Cheng, J. Du, Y. Tian, H. Liu, Z. Liao // *Energy and Fuels*. – 2016. – V. 30. – № 6. – P. 4529–4536.
40. Some Biogenic-Related Compounds Occluded inside Asphaltene Aggregates / C. Yang, Z. Liao, L. Zhang, P. Creux // *Energy and Fuels*. – 2009. – V. 23. – № 1–2. – P. 820–827.

Поступила 28.03.2018 г.

#### Информация об авторах

**Чешкова Т.В.**, кандидат химических наук, младший научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Сергун В.П.**, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Коваленко Е.Ю.**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Сагаченко Т.А.**, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

**Мин Р.С.**, доктор химических наук, главный научный сотрудник лаборатории гетероорганических соединений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук.

UDC 665.613.24:665.6.033.28

## STRUCTURE OF ASPHALTENES OCCURRING IN OILS OF DIFFERENT CHEMICAL NATURE

Tatyana V. Cheshkova<sup>1</sup>,  
chtv12@mail.ru

Valeriy P. Sergun<sup>1</sup>,  
sergyn@ipc.tsc.ru

Elena Yu. Kovalenko<sup>1</sup>,  
azot@ipc.tsc.ru

Tatyana A. Sagachenko<sup>1</sup>,  
dissovet@ipc.tsc.ru

Raisa S. Min<sup>1</sup>,  
lgosn@ipc.tsc.ru

<sup>1</sup> Institute of petroleum chemistry Siberian branch Russian academy of science,  
4, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the need to obtain and generalize information on composition and structure of asphaltene components in oils of different chemical nature, since the features of structural characteristics of asphaltenes have a significant effect on the depth of their thermal destruction. Recently the works in this area are of particular importance due to the steady increase of heavy oils, which differ from traditional oils with high contents of asphaltenes, in compositions of explored and recoverable reserves.

**The aim** of the research is the comparative analysis of structural-group compositions of asphaltenes in typical methane-naphthenic oil and heavy oil of a naphthenic-aromatic base, the molecular composition of structural fragments bonded in molecules of their asphaltene components through sulfide and ether bridges, and covalently unbonded compounds.

**Research methods:** elemental analysis, cryoscopy in benzene, extraction, liquid-adsorption chromatography, selective chemical destruction of sulfide and ether bonds, <sup>1</sup>H NMR spectroscopy, structural-group analysis, chromatography-mass spectrometry.

**Results.** The authors have carried out the comparative analysis of composition and structure of asphaltene components in methane-naphthenic and naphthenic-aromatic oils and identified the similarities and differences in their structural-group compositions, compositions of fragments bonded in asphaltene molecules via ether and sulfide bridges and in the compositions of compounds occluded by macromolecules of asphaltene substances. Using the methods of mild chemical destruction of sulfide and ether bonds, *n*-alkanes, cyclohexanes, steranes, hopanes, *n*-alkylbenzenes and *n*-alkyltoluenes were considered the most common fragments of asphaltene macromolecules in methane-naphthenic and naphthenic-aromatic types of oils. A peculiarity of asphaltene molecules in methane-naphthenic oil is the presence of alkenes and unsaturated steranes in composition of their structural fragments, while that in naphthenic-aromatic oil – pregnanes, cheilanthanes, thiophenic compounds and ethyl esters of alkane acids.

**Key words:**

Oil, asphaltenes, structural-group composition, selective chemical degradation, sulfur- and ether-bonded fragments, composition, saturated and aromatic hydrocarbons, heteroorganic compounds.

## REFERENCES

- Gordadze G.N., Giruts M.V., Koshelev V.N., Yusupova T.N. Distribution Features of Biomarker Hydrocarbons in Asphaltene Thermolysis Products of Different Fractional Compositions (Using as an Example Oils from Carbonate Deposits of Tatarstan Oilfields). *Petroleum Chemistry*, 2015, vol. 55, no. 1, pp. 22–31.
- Pan Y.H., Liao Y.H., Sun Y.G. The Characteristics of Bound Biomarkers Released from Asphaltenes in a Sequence of Naturally Biodegraded Oils. *Organic Geochemistry*, 2017, vol. 111, pp. 56–66.
- Wang W.G., Taylor C., Hu H., Humphries K.L., Jains A., Kitimet M., Scott T., Stewart Z., Ulep K.J., Houck S., Luxon A., Zhang B.Y., Miller B., Parish C.A., Pomerantz A.E., Mullins O.C., Zare R.N. Nanoaggregates of Diverse Asphaltenes by Mass Spectrometry and Molecular Dynamics. *Energy and Fuels*, 2017, vol. 31, no. 9, pp. 9140–9151.
- Zuo J.Y., Pan S., Wang K., Mullins O.C., Dumont H., Chen L., Mishra V., Canas J. Analysis of Asphaltene Instability Using Diffusive and Thermodynamic Models during Gas Charges into Oil Reservoirs. *Energy and Fuels*, 2017, vol. 31, no. 4, pp. 3717–3728.
- Chacon-Patino M.L., Blanco-Tirado C., Orrego-Ruiz J.A., Gomez-Escudero A., Combariza M.Y. Tracing the Compositional Changes of Asphaltenes after Hydroconversion and Thermal Cracking Processes by High-Resolution Mass Spectrometry. *Energy and Fuels*, 2015, vol. 29, no. 10, pp. 6330–6341.
- Kadiev Kh.M., Zaytseva O.V., Magomadov E.E., Chernysheva E.A., Oknina N.V., Batov A.E., Kadieva M.Kh., Kapustin V.M., Khadzhiev S.N. Structural Transformations of Asphaltenes during Hydroconversion of Vacuum Residue with Recycling the Hydroconversion Product Distillation Residue. *Petroleum Chemistry*, 2015, vol. 55, no. 6, pp. 487–496.
- Schuler B., Meyer G., Pena D., Mullins O.C., Gross L. Unraveling the Molecular Structures of Asphaltenes by Atomic Force Microscopy. *Journal of the American Chemical Society*, 2015, vol. 137, no. 31, pp. 9870–9876.
- Ghosh A.K., Chaudhuri P., Kumar B., Panja S.S. Review on Aggregation of Asphaltene vis-a-vis Spectroscopic Studies. *Fuel*, 2016, vol. 185, pp. 541–554.
- Chen Z.T., Zhang L.H., Zhao S.Q., Shi Q., Xu C.M. Molecular Structure and Association Behavior of Petroleum Asphaltene. *Structure and Bonding*, 2016, vol. 168, pp. 1–38.

10. Pomerantz A.E., Wu Q.H., Mullins O.C., Zare R.N. Laser-Based Mass Spectrometric Assessment of Asphaltene Molecular Weight, Molecular Architecture, and Nanoaggregate Number. *Energy and Fuels*, 2015, vol. 29, no. 5, pp. 2833–2842.
11. Evdokimov I.N., Fesan A.A., Losev A.P. New answers to the optical interrogation of asphaltenes: monomers and primary aggregates from steady-state fluorescence studies. *Energy and Fuels*, 2016, vol. 30, no. 6, pp. 4494–4503.
12. AlHumaidan F.S., Hauser A., Rana M.S., Lababidi H.M.S., Behbehani M. Changes in Asphaltene Structure during Thermal Cracking of Residual Oils: XRD Study. *Fuel*, 2015, vol. 150, pp. 558–564.
13. Chacon-Patino M.L., Rowland S.M., Rodgers R.P. Advances in Asphaltene Petroleomics. Part 1: Asphaltenes Are Composed of Abundant Island and Archipelago Structural Motifs. *Energy and Fuels*, 2017, vol. 31, no. 12, pp. 13509–13518.
14. Chacon-Patino M.L., Vesga-Martinez S.J., Blanco-Tirado C., Orrego-Ruiz J.A., Gomez-Escudero A., Combariza M.Y. Exploring Occluded Compounds and Their Interactions with Asphaltene Networks Using High-Resolution Mass Spectrometry. *Energy and Fuels*, 2016, vol. 30, no. 6, pp. 4550–4561.
15. Cheng B., Zhao J., Yang C.P., Tian Y.K., Liao Z.W. Geochemical Evolution of Occluded Hydrocarbons inside Geomacromolecules: a Review. *Energy and Fuel*, 2017, vol. 31, no. 9, pp. 8823–8832.
16. Mamin G.V., Gafurov M.R., Yusupov R.V., Gracheva I.N., Ganeeva Yu.M., Yusupova T.N., Orlinkii S.B. Toward the Asphaltene Structure by Electron Paramagnetic Resonance Relaxation Studies at High Fields (3.4 T). *Energy and Fuels*, 2016, vol. 30, no. 9, pp. 6942–6946.
17. Nelyubov D.V., Semikhina L.P., Vazhenin D.A., Merkul'ev I.A. Influence of Resins and Asphaltenes on the Structural and Rheological Properties of Petroleum Disperse Systems. *Petroleum Chemistry*, 2017, vol. 57, no. 3, pp. 203–208.
18. Sjoblom J., Simon S., Xu Z.H. Model Molecules Mimicking Asphaltenes. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, vol. 218, pp. 1–16.
19. Rogel E., Moir M. Effect of Precipitation Time and Solvent Power on Asphaltene Characteristics. *Fuel*, 2017, vol. 208, pp. 271–280.
20. Torkaman M., Bahrami M., Dehghani M. Influence of Temperature on Aggregation and Stability of Asphaltenes. I. Perikinetic Aggregation. *Energy and Fuels*, 2017, vol. 31, no. 10, pp. 11169–11180.
21. Molina D., Leon E.A., Chaves-Guerrero A. Understanding the Effect of Chemical Structure of Asphaltenes on Wax Crystallization of Crude Oils from Colorado Oil Field. *Energy and Fuels*, 2017, vol. 31, no. 9, pp. 8997–9005.
22. Sergun V.P., Cheshkova T.V., Sagachenko T.A., Min R.S. Chemical composition of petroleum from Krapivinskoye oilfield (message 3). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 7, pp. 59–66. In Rus.
23. Kovalenko E.Yu., Sergun V.P., Min R.S., Sagachenko T.A. Characteristic Structural Features of Asphaltene Macromolecules in Heavy Crude Oil from the Usinsk Field. *Chemistry and technology of fuels and oils*, 2014, vol. 49, no. 6, pp. 522–531.
24. Sergun V.P., Kovalenko E.Yu., Sagachenko T.A., Min R.S. Low-Molecular-Mass Asphaltene Compounds from Usa Heavy Oil. *Petroleum Chemistry*, 2014, vol. 54, no. 2, pp. 83–87.
25. Sergun V.P., Cheshkova T.V., Sagachenko T.A., Min R.S. Structural units with Sulfur and Ether/Ester Bonds in Molecules of High- and Low-Molecular-Weight Asphaltenes of Usa Heavy Oil. *Petroleum Chemistry*, 2016, vol. 56, no. 1, pp. 10–15.
26. Torlomeova A.E., Cheshkova T.V., Kovalenko E.Yu., Sagachenko T.A. Chemical composition of petroleum from Krapivinskoye oilfield (message 1). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 2, pp. 48–55. In Rus.
27. Altunina L.K., Kuvshinov V.A., Kuvshinov I.V., Stasyeva L.A., Chertentkov M.V., Shkrabyuk L.S., Andreev D.V. Physical-chemical and complex EOR/IOR technologies for the Permian-Carboniferous deposit of heavy oil of the Usinskoye oil field. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2017, no. 7, pp. 26–29.
28. Peng P., Morales-Izquierdo A., Hogg A., Strausz O.P. Molecular Structure of Athabasca Asphaltene: Sulfide, Ether, and Ester Linkages. *Energy and Fuels*, 1997, vol. 11, no. 5, pp. 1171–1187.
29. Golovko A.K., Kam'yanov V.F., Ogorodnikov V.D. High-Molecular Heteroatomic Components of Crude Oils of the Timan-Pechora Petroleum Basin. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 12, pp. 1374–1381.
30. Smirnov M.B., Poludetkina E.N., Vanyukova N.A. Unsaturated Hydrocarbons of Thermocatalytic Origin in Some Oils and Bitumens from the Southern Part of Anadyr Basin. *Petroleum Chemistry*, 2010, vol. 50, no. 3, pp. 189–199.
31. Cheshkova T.V., Kovalenko E.Yu., Gerasimova N.N., Sagachenko T.A., Min R.S. Composition and Structure of Resinous Components of Heavy Oil from the Usa Oilfield. *Petroleum Chemistry*, 2017, vol. 57, no. 1, pp. 31–38.
32. Sagachenko T.A., Sergun V.P., Cheshkova T.V., Kovalenko E.Y., Min R.S. Chemical Nature of the Oil and Tarry-Asphaltene Components of Natural Bitumen from the Ashal'chinsk Deposit in Tatarstan. *Solid Fuel Chemistry*, 2015, vol. 49, no. 6, pp. 349–355.
33. Antipenko V.R., Cheshkova T.V. Composition of compounds bonded through ether and sulfide bridges in oils of natural bitumen from the Ashalchinsk deposit. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 3, pp. 16–21. In Rus.
34. Payzant J.D., Lown E.M., Strausz O.P. Structural units of Athabasca Asphaltene – the Aromatics with a Linear Carbon Framework. *Energy and Fuels*, 1991, vol. 5, no. 3, pp. 445–453.
35. Snowdon L.R., Volkman J.K., Zhang Z.R., Tao G.L., Liu P. The Organic Geochemistry of Asphaltenes and Occluded Biomarkers. *Organic Geochemistry*, 2016, vol. 91, no. 1, pp. 3–15.
36. Antipenko V.R. *Termicheskie prevrashcheniya vysokomernistogo prirodnogo asfaltita: geokhimicheskie i tekhnologicheskie aspekty* [Thermal transformations of high-sulfur natural asphaltite: geochemical and technological aspects]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2013. 184 p.
37. Kayukova G.P., Uspensky B.V., Abdrafikova I.M., Musin R.Z. Characteristic Features of the Hydrocarbon Composition of Spiridonovskoe (Tatarstan) and Pitch Lake (Trinidad and Tobago) Asphaltenes. *Petroleum Chemistry*, 2016, vol. 56, no. 7, pp. 572–579.
38. Gordadze G.N. *Uglevodorody v neftyanoy geokhimii. Teoriya i praktika* [Hydrocarbons in petroleum geochemistry. Theory and practice]. Moscow, Russian State University of Oil and Gas named after I.M. Gubkina Publ., 2015. 559 p.
39. Cheng B., Du J., Tian Y., Liu H., Liao Z. Thermal Evolution of Adsorbed/Occluded Hydrocarbons inside Kerogens and its Significance as Exemplified by One Low-Matured Kerogen from Santanghu Basin, Northwest China. *Energy and Fuels*, 2016, vol. 30, no. 6, pp. 4529–4536.
40. Yang C., Liao Z., Zhang L., Creux P. Some Biogenic-Related Compounds Occluded inside Asphaltene Aggregates. *Energy and Fuels*, 2009, vol. 23, no. 1–2, pp. 820–827.

Received: 28 March 2018.

**Information about the authors**

*Tatyana V. Cheshkova*, Cand. Sc., junior researcher, Institute of petroleum chemistry Siberian branch Russian academy of science.

*Valeriy P. Sergun*, Cand. Sc., researcher, Institute of petroleum chemistry Siberian branch Russian academy of science.

*Elena Yu. Kovalenko*, Cand. Sc., senior researcher, Institute of petroleum chemistry Siberian branch Russian academy of science.

*Tatyana A. Sagachenko*, Dr. Sc., leading researcher, Institute of petroleum chemistry Siberian branch Russian academy of science.

*Raisa S. Min*, Dr. Sc, chief researcher, Institute of petroleum chemistry Siberian branch Russian academy of science.

УДК 62–665.4

## К ВОПРОСУ О ПЕРЕХОДЕ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ С ТРАДИЦИОННЫХ ТОПЛИВ НА ОРГАНОВОДОУГОЛЬНЫЕ ТОПЛИВНЫЕ КОМПОЗИЦИИ

Курганкина Маргарита Александровна<sup>1</sup>,  
mad2@tpu.ru

Вершинина Ксения Юрьевна<sup>1</sup>,  
vershininaks@gmail.com

Озерова Ирина Петровна<sup>1</sup>,  
ozer@tpu.ru

Медведев Валерий Васильевич<sup>1</sup>,  
t45ap@tpu.ru

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью эффективной утилизации многочисленных аккумулированных отходов углеобогащения и нефтепереработки в составе водоугольных и органоводоугольных топлив, существенного снижения потребления полезных ископаемых для получения тепловой и электрической энергии, минимизации влияния теплотехнологии на здоровье населения и состояние природы.

**Цель исследования:** оценка преобразования систем топливоподачи при переходе тепловых электрических станций с твердого, жидкого и газового топлива на органоводоугольные топлива; проведение технико-экономического анализа применения органоводоугольных топлив на ТЭС с учетом основных статей затрат.

**Объект:** тепловая электрическая станция тепловой мощностью 800 Гкал/ч и электрической мощностью 300 МВт, расположенная в Сибирском регионе Российской Федерации. В качестве основных видов топлива используется каменный уголь марки «Д» и природный газ, в качестве растопочного топлива используется мазут.

**Методы:** проведение технико-экономического анализа эффективности перехода тепловой электрической станции с традиционного топлива на органоводоугольные топлива путем расчета следующих затрат: топливные, эксплуатационные, хранение топлива, хранение и утилизация золошлаковых отходов, уплата штрафов и экологические мероприятия, переоборудование системы топливного хозяйства.

**Результаты.** Переход с традиционного твердого топлива (угля) на органоводоугольные суспензии существенно упрощает системы топливных хозяйств ТЭС и котельных, так как для создания таких систем требуется значительно меньшее количество оборудования. При выработке общей установленной мощности всеми угольными электростанциями мира за счет сжигания органоводоугольных топлив экономия одних только топливных затрат может составить от сотен млн р до десятков млрд р в год.

### Ключевые слова:

Тепловая электрическая станция, система топливного хозяйства, водоугольное топливо, органоводоугольное топливо, технико-экономический анализ, антропогенные выбросы.

### Введение

Согласно данным международного энергетического агентства [1], в настоящее время мир сжигает больше угля, чем когда-либо за всю историю. Мировое потребление угля увеличилось более чем на 15 % с 3480 млн т в 2007 г. до 3887 млн т в 2013 г. [2], что в среднем составляет 1,8 % в год (рис. 1).

Следует отметить, что с 2014 по 2016 гг. наблюдается замедление роста потребления угля. В первую очередь, данный факт обусловлен тем, что ряд стран, например Китай и США, дошли до определенного предела в развитии угольной энергетики и осознали опасность, которую несет сжигание угля на тепловых электрических станциях (ТЭС) для здоровья и жизни людей, а также окружающей среды в целом [3]. В США рекордными числами закрываются угольные ТЭС и в ближайшее время эта тенденция не изменится [4]. В свою очередь, Правительство Китая ведет активную политику,

направленную на снижение выбросов путем сокращения доли угля в энергопотреблении [5].

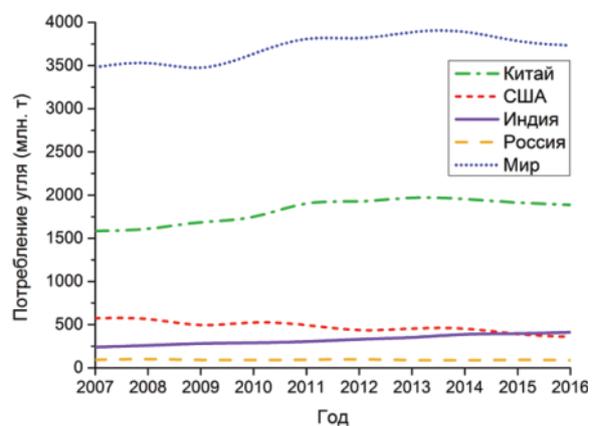


Рис. 1. Объемы потребления угля за 2007–2016 гг.

Fig. 1. Trends of coal consumption in 2007–2016

Следует отметить, что с 2014 по 2016 гг. наблюдается замедление роста потребления угля. В первую очередь, данный факт обусловлен тем, что ряд стран, например Китай и США, дошли до определенного предела в развитии угольной энергетики и осознали опасность, которую несет сжигание угля на тепловых электрических станциях (ТЭС) для здоровья и жизни людей, а также окружающей среды в целом [3]. В США рекордными числами закрываются угольные ТЭС и в ближайшее время эта тенденция не изменится [4]. В свою очередь, Правительство Китая ведет активную политику, направленную на снижение выбросов путем сокращения доли угля в энергопотреблении [5].

Вопросам снижения концентраций выбросов загрязняющих веществ в атмосферу энергетическими предприятиями и повышения жизненного уровня населения уделяется значительное внимание также и в других странах, например в Индии, Японии, России [6–8]. В последние годы активно развивается тематика применения водоугольных (ВУТ) и органоводоугольных (ОВУТ) топливных суспензий на ТЭС [9–11] взамен традиционного пылеугольного сжигания.

К настоящему времени достаточно хорошо изучены процессы зажигания и горения водоугольных и органоводоугольных суспензий [9–11], вопросы приготовления подобных топлив и их реологические характеристики [12, 13], а также экономические и экологические характеристики [14, 15]. Результаты научных исследований [9–15] дают основание полагать, что ВУТ и ОВУТ являются достойной альтернативой углю в качестве основного топлива на ТЭС. К сожалению, позиции энергетиков, экологов и населения по вопросам использования ВУТ и ОВУТ вместо угля расходятся вследствие разных интересов. Как следствие, результаты исследований, перечисленных в работах [9–15], достаточно редко доходят до практического использования.

Применение ВУТ и ОВУТ в энергетическом секторе может служить основой для эффективной утилизации многочисленных аккумулированных отходов углеобогащения и нефтепереработки, существенного снижения потребления полезных ископаемых для получения тепловой и электрической энергии, минимизации влияния теплоэнергетики на здоровье населения и состояние природы.

В данной работе авторы предлагают в качестве горючей составляющей суспензий использовать отходы углеобогащения (фильтр-кеки), которые, по сути, представляют уже готовые суспензии ВУТ. Это значительно упростит схемы систем топливоподачи, особенно для угольных ТЭС, где большую часть оборудования составляют устройства для измельчения угля и приготовления угольной пыли. Исходя из этого, представляет особый интерес изучение вопроса технологических изменений в системах топливоподачи существующих ТЭС (работающих не только на твердом, но также

на жидком и газообразном топливах) при внедрении ОВУТ в качестве топлива, а также экономический эффект, который может быть получен при осуществлении этих изменений.

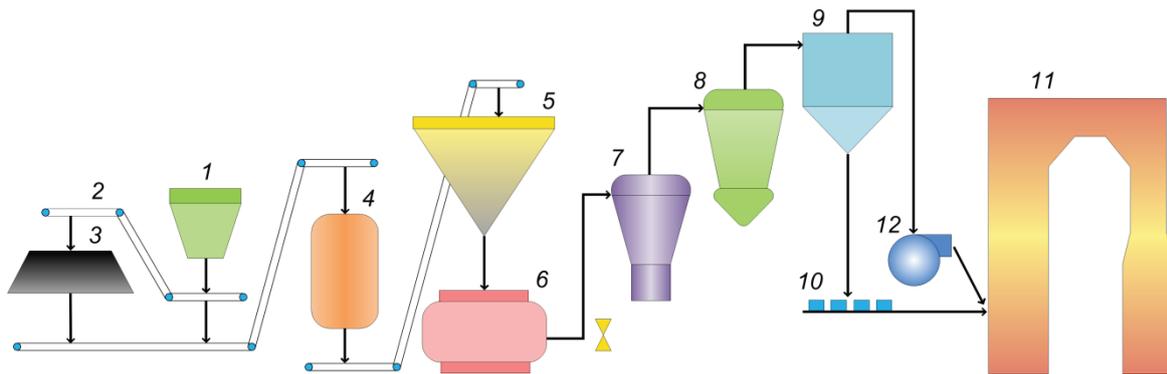
Следует отметить, что авторы работы также предлагают произвести переход ТЭС с традиционного топлива на ОВУТ только в тех регионах, где это является целесообразным, в частности в регионах с развитой добычей и обогащением угля (Кемеровская область, Красноярский край, Иркутская область, Донецкая область и др.). Так как существующие в этих регионах ТЭС преимущественно являются угольными, следовательно, особо остро стоит проблема экологии: высокие антропогенные выбросы, накопление объемов отходов углеобогащения. При этом вполне реально осуществить транспортировку фильтр-кеков от обогащительных фабрик до ближайших ТЭС. Однако следует учитывать климат региона, так как низкие отрицательные температуры могут затруднять транспортировку фильтр-кеков.

В работе [16] представлены результаты выполненных технико-экономических оценок перехода трех типичных объектов энергетики (две тепловые электрические станции, одна котельная установка) с фактически используемого топлива (угля, газа и мазута) на ОВУТ. В данных расчетах были учтены следующие статьи расходов: затраты, связанные с приобретением компонентов ОВУТ; затраты на хранение топлива; затраты на складирование и утилизацию золошлаковых отходов (ЗШО); затраты на экологические мероприятия. Однако авторы статьи [16] не рассматривали конкретные технологические изменения в системах топливных хозяйств электростанций, к которым приведет замена топлива. Соответственно, не были учтены затраты на осуществление этих изменений. Кроме того, представляет интерес сравнение затрат, необходимых для реализации технического перевооружения существующих систем топливоподачи, использующих в качестве основного топлива ОВУТ.

Цель работы – оценка преобразования систем топливоподачи при переходе ТЭС с твердого, жидкого и газового топлива на ОВУТ. Задачи работы: анализ существующих схем топливных хозяйств на твердом, жидком и газовом топливе для использования суспензий ОВУТ на ТЭС; на примере типичного объекта энергетики (ТЭС) провести технико-экономический анализ эффективности перехода от традиционного топлива на суспензии ОВУТ.

#### **Изменения в технологических схемах топливных хозяйств ТЭС**

В качестве типового объекта энергетики была рассмотрена ТЭС тепловой мощностью 800 Гкал/ч и электрической мощностью 300 МВт. Вид используемого топлива – каменный уголь марки «Д» (основное топливо), природный газ (основное топливо), мазут (для растопки) [16]. На рассматриваемой станции реализованы три вида системы топливоподачи: для твердого, жидкого и газо-



**Рис. 2.** Технологическая схема угольного хозяйства ТЭС: 1 – приемный бункер; 2 – ленточный транспортер; 3 – склад угля; 4 – дробильная установка; 5 – бункер сырого угля; 6 – пылеугольная мельница; 7 – сепаратор; 8 – циклон; 9 – бункер угольной пыли; 10 – питатель угля; 11 – паровой котел; 12 – мельничный вентилятор

**Fig. 2.** Coal-handling system scheme: 1 is the receiving hopper; 2 is the transport line; 3 is the coal supply; 4 is the coal crusher; 5 is the raw coal bunker; 6 is the pulveriser; 7 is the sizer; 8 is the cyclone; 9 is the pulverized coal bunker; 10 is the feeder; 11 is the steam generator; 12 is the fan

вого топлива. Рассмотрены технологические схемы каждой из трех систем. Затем были выполнены преобразования существующих схем для использования ОБУТ на рассмотренной станции.

#### Топливное хозяйство ТЭС на твердом топливе

Типичная схема топливного хозяйства ТЭС на твердом топливе показана на рис. 2.

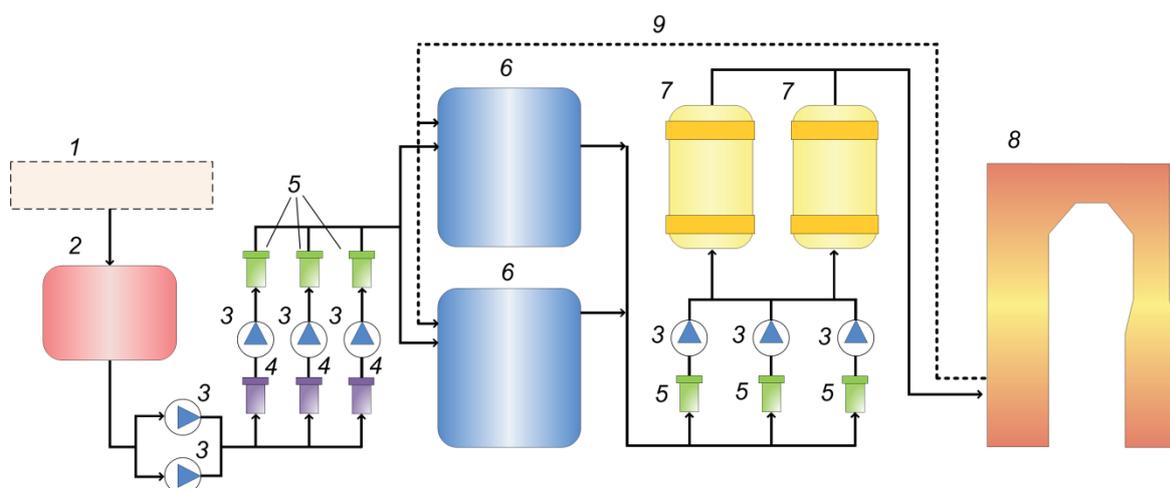
Топливо в железнодорожных вагонах поступает к разгрузочным устройствам – 1, откуда с помощью ленточных транспортеров – 2 направляется на склад – 3. Со склада топливо подается в дробильную установку – 4. Из дробильной установки – 4 топливо поступает в бункера сырого угля – 5, а оттуда – в пылеугольную мельницу – 6. Угольная пыль пневматически транспортируется через сепаратор – 7 и циклон – 8 в бункер угольной пыли – 9, а оттуда пи-

тателями – 10 к горелкам котла – 11. Воздух из циклона засасывается мельничным вентилятором – 12 и подается в топочную камеру котла – 11.

#### Топливное хозяйство ТЭС на жидком топливе

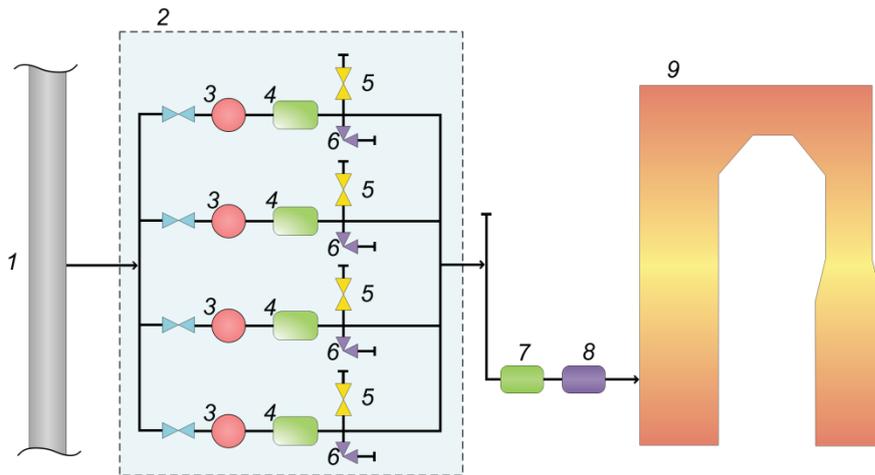
Типичная схема мазутного хозяйства представлена на рис. 3.

Из приемного сливного устройства – 1 (включающего в себя железнодорожные цистерны, эстакаду, переносной сливной лоток, сливной желоб и отводящую трубу) мазут поступает в приемную емкость – 2. Из нее насосами – 3 мазут подается в фильтры грубой очистки – 4, фильтры тонкой очистки – 5 и закачивается в емкость мазутохранилища – 6. Из емкости мазутохранилища – 6 через фильтры тонкой очистки – 5 и подогреватели – 7 насосами – 3 мазут подается в горелки котельного



**Рис. 3.** Технологическая схема мазутного хозяйства (с наземным мазутохранилищем) ТЭС: 1 – приемное устройство; 2 – приемная емкость; 3 – насос; 4 – фильтр грубой очистки; 5 – фильтр тонкой очистки; 6 – мазутохранилище; 7 – подогреватель; 8 – паровой котел; 9 – линия рециркуляции

**Fig. 3.** Fuel oil-handling system scheme: 1 is the receiving unit; 2 is the receiving tank; 3 is the pump; 4 is the pre-filter; 5 is the fine filter; 6 is the storage tank; 7 is the heater; 8 is the steam generator; 9 is the recirculation line



**Рис. 4.** Технологическая схема газового хозяйства ТЭС: 1 – магистральный газопровод; 2 – газораспределительный пункт; 3 – фильтр; 4 – регулятор давления; 5 – свеча для продувки газопровода; 6 – предохранительный клапан; 7 – отсечной клапан; 8 – регулирующий клапан; 9 – паровой котел

**Fig. 4.** Gas-handling system scheme: 1 is the main gas pipeline; 2 is the gas-distributing plant; 3 is the gas filter; 4 is the pressure controller; 5 is the purge plug; 6 is the safety plug; 7 is the on-off valve; 8 is the regulation valve; 9 is the steam generator

агрегата – 8. Часть разогретого мазута направляется по линии рециркуляции – 9 в мазутохранилище – 6 для разогрева находящегося там мазута.

Топливное хозяйство ТЭС на газовом топливе

Типичная схема топливного хозяйства электростанции, работающей на газовом топливе, представлена на рис. 4.

Газ поступает на электростанцию от магистрального газопровода – 1 (или от газораспределительной станции – ГРС). Для снижения давления до необходимого (по условиям работы горелок котлов) устанавливается газораспределительный пункт (ГРП) – 2. ГРП размещен в отдельном здании на территории ТЭС и оборудован предохранительными, противопожарными и противозрывными устройствами (фильтр – 4, регулятор давления газа – 5, свеча для продувки газопровода – 6, предохранительный запорный клапан – 7 и пр.). От ГРП – 2 газ по трубопроводу через отсечной – 7 и регулирующий – 8 клапаны подается к горелкам парового котла – 9.

Технологические изменения в схемах топливных хозяйств ТЭС при внедрении ОВУТ

Применение ОВУТ существенно упрощает систему топливного хозяйства (рис. 5).

В частности, исключается необходимость в оборудовании, предназначенном для хранения, измельчения и транспортировки угля, а также в оборудовании мазутного и газового хозяйств. Исключением являются резервуары для хранения мазута. В данных емкостях будут храниться компоненты ОВУТ (фильтр-кек, отработанная горючая жидкость и, при необходимости, дополнительный горючий компонент (например, солома, древесные опилки, углеродный остаток пиролиза автомобильных покрышек и пр.) [16].

#### Технико-экономический анализ применения органоводоугольного топлива на тепловой электрической станции

Основные затраты

Технико-экономический анализ был проведен в соответствии с методиками [16, 17]. На основании имеющихся данных [16] о виде топлива, его энергетических характеристиках, расходе и стоимости была проведена оценка экономического эффекта при переходе ТЭС с традиционного топлива на суспензии ОВУТ. В данной работе были использованы полученные ранее данные о денежных затратах [16] и приведена новая (дополнительная) статья затрат на оборудование системы топливного хозяйства:

1) *Топливные затраты* [16] рассчитывались в соответствии со средней рыночной стоимостью компонентов ОВУТ (с учетом предполагаемых затрат на их транспортировку). Выражение для расчета топливных затрат:

$$S_1 = C_t \cdot V_t, \quad (1)$$

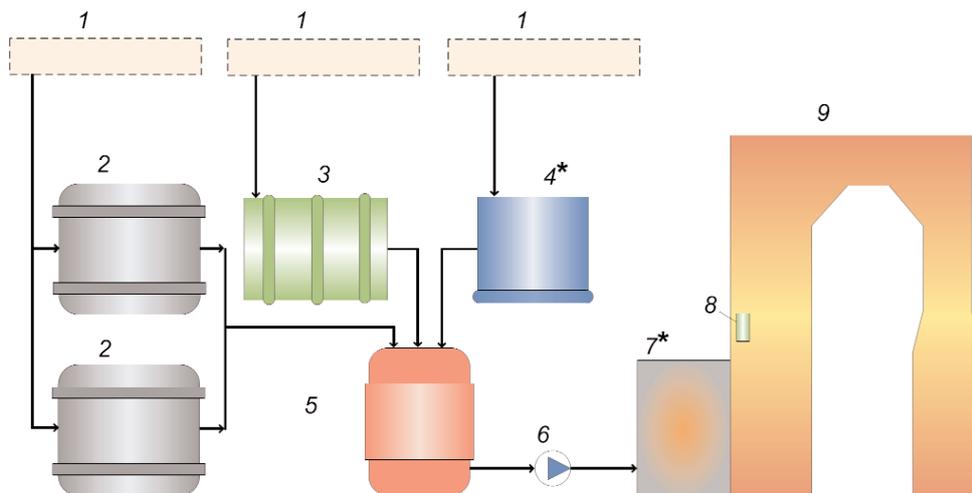
где  $C_t$  – среднерыночная цена топлива, р./т;  $V_t$  – объем сжигаемого топлива, т.

2) *Эксплуатационные затраты* – затраты на электроэнергию для приготовления угольной пыли и ОВУТ (на основе данных [16] о расходе и стоимости электрической энергии):

$$S_2 = G_s \cdot C_s, \quad (2)$$

где  $G_s$  – расход электроэнергии на пылеприготовление и на приготовление суспензии ОВУТ, кВт·ч/год;  $C_s$  – стоимость электроэнергии, р/(кВт·ч).

3) *Затраты на складирование и утилизацию золошлаковых отходов.* В соответствии с [16] переход на суспензии ОВУТ не приведет к значительному увеличению золошлаковых отходов (ЗШО). Поэтому дополнительных затрат не требуется.



**Рис. 5.** Технологическая схема топливного хозяйства ТЭС, работающей на ОВУТ: 1 – приемное устройство; 2 – резервуар для хранения фильтр-кека; 3 – резервуар для хранения отработанной горючей жидкости; 4\* – резервуар для хранения дополнительного компонента; 5 – емкость для ОВУТ с гомогенизатором; 6 – насос; 7\* – предтопок; 8 – форсунка; 9 – паровой котел  
 \* по требованию заказчика

**Fig. 5.** Fuel-handling system scheme operating on coal-water slurry containing petrochemicals: 1 is the receiving unit; 2 is the storage tank for filter cake; 3 is the storage tank for used combustible liquid; 4\* is the storage tank for additional component; 5 is the tank with homogenizer; 6 is the pump; 7\* is the extended furnace; 8 is spray nozzle; 9 is the steam generator  
 \* at the customer's request

- 4) Затраты на экологические мероприятия или уплату штрафов. Согласно [14, 16, 18], суспензии ОВУТ снижают концентрации выбросов  $SO_x$  и  $NO_x$ , а также летучей золы, следовательно, дополнительных затрат не требуется.
- 5) Затраты на оборудование системы топливного хозяйства рассчитаны на основе средней рыночной стоимости оборудования, входящего в существующую систему топливного хозяйства ТЭС. Также были учтены затраты на хранение топлива с учетом необходимого резерва, которые были рассчитаны на основе данных [16] о необходимом резерве топлива, существующих складах и резервуарах на ТЭС. Также учитывалось дополнительное оборудование, необходимое для хранения ОВУТ.

Затраты на оборудование систем топливного хозяйства ТЭС

На основе информации [19] о количестве котлов на рассматриваемой станции (10 паровых котлов) и организации системы топливного хозяйства (например, в случае системы для твердого топлива – индивидуальные системы пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами (ШБМ) и промежуточными пылевыми бункерами) были рассчитаны затраты на существующее топливное хозяйство станции, включающее в себя систему для твердого, жидкого и газового топлив. При расчете затрат на топливную систему для ОВУТ учитывалось уже имеющееся оборудование на станции и его возможное дальнейшее использование при функционировании новой си-

стемы для ОВУТ. Так, например, на рассматриваемой станции имеются два бака объемом  $600 \text{ m}^3$ , которые можно использовать для хранения отработанной горючей жидкости и дополнительного горючего компонента. Далее была определена денежная экономия на системе топливного хозяйства при переходе рассматриваемой станции на ОВУТ. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Экономия (табл. 1), которая достигается при переходе с традиционного топлива на сжигание ОВУТ, обусловлена значительным сокращением количества необходимого оборудования для новой системы, следовательно, затраты на систему также сокращаются.

Итоговые затраты, связанные с переходом ТЭС на ОВУТ

С учетом расчетов, представленных в работе [16], было проведено суммирование всех затрат, необходимых при переходе с традиционного топлива на ОВУТ. Рассмотренные топливные суспензии имели следующие концентрации компонентов в своем составе [16]: ОВУТ № 1 (фильтр-кеки каменного угля 49,5 %, фусы 10 %, пластификатор 0,5 %, техническая вода 40 %); ОВУТ № 2 (фильтр-кеки каменного угля 49,5 %, нефтяные отложения 10 %, пластификатор 0,5 %, техническая вода 40 %); ОВУТ № 3 (фусы 15 %, каменные угли 44,5 %, пластификатор 0,5 %, техническая вода 40 %); ОВУТ № 4 (фильтр-кеки каменного угля 49,5 %, моторное масло 10 %, пластификатор 0,5 %, техническая вода 40 %). Результаты представлены в табл. 2.

**Таблица 1.** Сравнение расходов на оборудование системы топливного хозяйства ТЭС

**Table 1.** Comparison of costs for fuel-handling system equipment

Узел Unit	Количество Quantity	Цена/шт., тыс. р. Unitary cost, thousand rubles	Сумма, тыс. р. Total, thou- sand rubles
Топливное хозяйство ТЭС на твердом топливе Coal-handling system			
Разгрузочное устройство Discharge facility	1	44000	44000
Склад Coal supply	1	2000	2000
Ленточный транспортер Transport line	1	2000	2000
Дробильная установка Coal crusher	1	1000	1000
Пылеугольная мельница Pulveriser	20	30000	600000
Бункер сырого угля Raw coal bunker	20	2000	40000
Сепаратор Sizer	20	400	8000
Циклон Cyclone	20	200	4000
Бункер угольной пыли Pulverized coal bunker	20	1500	30000
Питатель пыли Feeder	60	1500	90000
Взрывной предохра- нительный клапан Safety-valve	160	20	3200
Дымосос инертных газов Induced-draft fan	20	100	2000
Мельничный вентилятор Fan	20	200	4000
Топливное хозяйство ТЭС на жидком топливе Fuel oil-handling system			
Приемное устройство Receiving unit	1	1000	1000
Мазутохранилище Storage tank	2	2400	4800
Фильтр (грубой и тонкой очистки) Filter (pre-filter and fine filter)	9	110	990
Насос Pump	6	37	222
Подогреватель Heater	2	220	440
Форсунка Burner	60	40	2400

\*по требованию заказчика (возможна реализация системы без резервуара для хранения дополнительного компонента и предтопка).

\*at the customer's request (it is possible to implement a system without a storage tank for additional component and extended furnace).

**Окончание табл. 1**

**Table 1**

Узел Unit	Количество Quantity	Цена/шт., тыс. р. Unitary cost, thousand rubles	Сумма, тыс. р. Total, thou- sand rubles
Топливное хозяйство ТЭС на газовом топливе Gas-handling system			
Конденсатоотвод Connected drain	1	45	45
Расходомер Flow rate meter	1	75	75
Фильтр Gas filter	4	25	100
Регулятор давления Pressure controller	4	60	240
Клапан предохра- нительный Safety plug	4	130	520
Клапан отсечной On-off valve	10	25	250
Клапан регулирующий Regulation valve	10	45	450
Свеча для продувки газопровода Purge plug	1	1	1
Итого Total			841733
Топливное хозяйство ТЭС на ОБУТ Fuel-handling system working at CWSP			
Резервуар для хранения фильтр-кека Storage tank for filter cake	3	2800	8400
Резервуар для хранения отработанной горючей жидкости Storage tank for used combustible liquid	1	–	–
Резервуар для хранения дополнительного горю- чего компонента* Storage tank for additi- onal component*	1	–	–
Резервуар для хранения ОБУТ с гомогенизатором Tank with homogenizer	10	3000	30000
Предтопок* Extended furnace*	10	1500	15000
Устройство подачи то- плива (форсунки, насос, трубопровод) Fuel feeding device (bur- ners, pump, pipeline)	10	3500	35000
Итого Total			93200
Экономия при переходе на ОБУТ Economy from switching			743733

Экономия (табл. 1), которая достигается при переходе с традиционного топлива на сжигание ОБУТ, обусловлена значительным сокращением количества необходимого оборудования для новой системы, следовательно, затраты на систему также сокращаются.

Итоговые затраты, связанные с переходом ТЭС на ОБУТ

С учетом расчетов, представленных в работе [16], было проведено суммирование всех затрат, необходимых при переходе с традиционного топлива на ОБУТ. Рассмотренные топливные суспензии имели следующие концентрации компонентов в своем составе [16]: ОБУТ № 1 (фильтр-кеки каменного угля 49,5 %, фусы 10 %, пластификатор 0,5 %, техническая вода 40 %); ОБУТ № 2 (фильтр-кеки каменного угля 49,5 %, нефтяные отложения 10 %, пластификатор 0,5 %, техническая вода 40 %); ОБУТ № 3 (фусы 15 %, каменные угли 44,5 %, пластификатор 0,5 %, техническая вода 40 %); ОБУТ № 4 (фильтр-кеки каменного угля 49,5 %, моторное масло 10 %, пластификатор 0,5 %, техническая вода 40 %). Результаты представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Денежные потоки при переходе ТЭС на ОБУТ (с учетом данных [16])

**Table 2.** Cash flows when switching to CWSP

Перечень затрат, млн р. List of expenses, million rubles	Фактическое топливо Actual fuel	Состав ОБУТ CWSP composition			
		1	2	3	4
Топливные затраты Fuel costs	5878,6	762,1	844,7	3088,5	3569,4
Затраты на подготовку: Preparation expenses:					
Капитальные Capital costs	–	–	–	–	–
Эксплуатационные Operating costs	45,9	13,3	13,1	12,9	13,1
Затраты на ЗШО Ash and slag waste costs	–	–	–	–	–
Затраты на экологические мероприятия Environmental costs	–	–	–	–	–
Затраты на оборудование системы топливного хозяйства Fuel-handling system costs	841,7	93,2	93,2	93,2	93,2
Итоговые затраты Total costs	6766,2	873,3	955,7	3199,3	3680,4
Экономия Economy from switching	–	5892,9	5810,5	3566,9	3085,7

Следует отметить, что при проведении расчетов не учитывались затраты, связанные с демонтажем выводимого из эксплуатации оборудования. Данную статью затрат при реализации перехода станции с традиционного топлива на ОБУТ необходимо

уточнять. В данной работе затраты на демонтаж оборудования были приняты как 10 % от стоимости топливной системы, что составило 84173 тыс. р. С учетом данной статьи экономия при переходе на ОБУТ составит 659560 тыс. р.

Авторами работы были также рассмотрены станции, работающие только на газе или только на угле [16]. Станция, работающая только на мазуте, не была принята к рассмотрению, так как в основном данное топливо используется для растопки паровых котлов. В частности, при переходе на ОБУТ станции (тепловой мощностью 780 Гкал/ч, электрической мощностью 140 МВт), основным топливом которой является природный газ, экономия затрат составила [16] 75028,2 тыс. р. При переходе на ОБУТ станции (тепловой мощностью 1,2 Гкал/ч), основным топливом которой является каменный уголь, экономия затрат составила [16] 1329,1 тыс. р.

Таким образом, выполненные технико-экономические оценки свидетельствуют о целесообразности перехода типового объекта энергетики с традиционного топлива на суспензии ОБУТ (даже с учетом дополнительных затрат на преобразование существующей системы топливного хозяйства на станции).

#### Экологические, энергетические и экономические характеристики применения органоводугольного топлива

Экспериментальные исследования по установлению экологических характеристик сжигания ОБУТ, представленные в [14, 16, 18], показали, что применение таких суспензионных топлив имеет явные преимущества в сравнении с пылевидным и слоевым сжиганием угля. Было установлено существенное снижение концентраций антропогенных выбросов (по сравнению с углем) – NO<sub>x</sub> на 20 %, SO<sub>x</sub> на 40 %, летучей золы на 20 % [14, 16, 18] – при низкотемпературном (700–1000 °С) режиме сжигания топлив.

Добавление жидкого горючего компонента (например, отработанного турбинного масла) приводит к незначительному повышению выбросов (в несколько раз по сравнению с ВУТ) [18], но при этом установленные значения концентраций NO<sub>x</sub> и SO<sub>x</sub> для ОБУТ не превышают соответствующие значения выбросов для углей [18]. К тому же добавление жидкого горючего компонента способствует повышению энергетических характеристик топлив [20].

Значения теплоты сгорания суспензий ОБУТ в 1,5–2 раза меньше по сравнению со значениями теплот сгорания углей [20]. В связи с этим, для того чтобы ТЭС могли вырабатывать свою установленную мощность, объем сжигаемого ОБУТ необходимо увеличить практически в два раза.

Таким образом, проведенные оценки в первом приближении иллюстрируют значительный потенциал суспензионных топлив в связи с возможностями масштабной утилизации многих опасных отходов в их составе, замены дорогостоящих и де-

фицитных видов топлив, диверсификации сырьевого рынка, а также решения ряда проблем, возникающих при эксплуатации пылеугольных котельных и ТЭС (пожаро- и взрывоопасность угольной пыли, загрязнение атмосферы выбросами вредных веществ) в странах, являющихся лидерами по выработке энергии за счет сжигания угля (в частности, России, Китая, США, Индии).

#### Выводы

1. Переход с традиционного твердого топлива (угля) на суспензии ОБУТ (на основе фильтр-кеков) существенно упрощает системы топливных хозяйств ТЭС и котельных, так как для создания таких систем требуется значительно меньшее количество оборудования. В частности, исключается необходимость в оборудовании, предназначенном для хранения, измельчения и транспортировки угля, а также в оборудовании газового хозяйства и частично мазутного.
2. При выработке общей установленной мощности всеми угольными электростанциями мира за счет сжигания ОБУТ (переход которых целесообразно осуществить) экономия одних только топливных затрат может составить от сотен млн р. до десятков млрд р. в год.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Medium-Term Coal Market Report 2016. – Paris: International Energy Agency, 2016. – 141 p.
2. Coal information: overview. – Paris: International Energy Agency, 2017. – 8 p.
3. Проблема снижения выбросов ртути при сжигании угля на ТЭС / А.М. Зыков, С.Н. Аничков, К.И. Колчин, Г.В. Гончаренко, Л.Г. Менчиков, И.К. Коршевец, Е.Д. Стрельцова, М.Ю. Леонова // Энергетик. – 2014. – № 3. – С. 69–70.
4. The US Coal Crash. Evidence for Structural Change. – London: Carbon Tracker Initiative, 2015. – 48 p.
5. Co-firing of oil sludge with coal-water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler / J. Liu, X. Jiang, L. Zhou, H. Wang, X. Han // Journal Hazardous Materials. – 2009. – V. 167. – Iss. 1–3. – P. 817–823.
6. Guttikunda S.K., Jawahar P. Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India // Atmospheric Environment. – 2014. – V. 92. – P. 449–460.
7. Тайлашева Т.С., Красильникова Л.Г., Воронцова Е.С. Оценка вредных выбросов в атмосферу от котельных Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 52–55.
8. Крылов Д.А. Микроэлементы в топливе и золошлаковых отходах угольных электростанций // Энергетик. – 2012. – № 11. – С. 36–39.
9. Results of study of sulfur oxide reduction during combustion of coal-water slurry fuel through use of sulfur capturing agents / V.I. Murko, V.I. Karpenok, Y.A. Senchurova, O.V. Tailakov, A.R. Bogomolov, V.A. Khyamyalyain // MATEC Web Conferences. – 2016. – V. 72. – Article number 01074.
10. Технологии получения и сжигания топливных водоугольных суспензий из монгольских бурых углей / В.И. Мурко, В.И. Федяев, М.П. Баранова, С.Т. Батмунх, Д.Б. Балдандорж, Ч.Б. Сухэ-батор // Энергетик. – 2011. – № 4. – С. 35–38.
11. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects / D.O. Glushkov, S.V. Syrodoy, A.V. Zakharevich, P.A. Strizhak // Fuel Processing Technology. – 2016. – V. 148. – P. 224–235.

3. Переход угольных ТЭС с традиционного топлива на суспензии ОБУТ позволит решить несколько глобальных проблем человечества. *Первая* – утилизация широкого класса отходов угле- и нефтепереработки. Это позволит не только утилизировать уже накопленные отходы (объемы составляют: отходы углеобогащения более 800 млн т, отходы нефтепереработки более 1 млрд т), но также предотвратить накопление вновь образующихся отходов. *Вторая* – снижение концентраций антропогенных выбросов угольными предприятиями энергетики ( $SO_x$  на 40 %,  $NO_x$  на 20 %), что подразумевает снижение негативного воздействия на окружающую среду, доли заболеваемости и смертности, вызванной плохим состоянием окружающего воздуха. *Третья* – рациональное использование природных ресурсов не только с целью сохранения природы, но и самих природных ресурсов, которые понадобятся для жизни следующим поколениям.

*Исследования выполнены в рамках стратегического плана развития Национального исследовательского Томского политехнического университета как одного из ведущих университетов мира (проект ВИУ-ИШФВП-184/2018).*

12. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal-water suspensions // Fuel. – 2011. – V. 90. – P. 865–877.
13. The rheodynamics and combustion of coal-water mixtures / A.P. Burdukov, V.I. Popov, V.G. Tomilov, V.D. Fedosenko // Fuel. – 2002. – V. 81. – P. 927–933.
14. Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals // Journal Hazardous Materials. – 2017. – V. 338. – P. 148–159.
15. Khodakov G.S. Coal-water suspensions in power engineering // Thermal Engineering. – 2007. – V. 54. – Iss. 1. – P. 36–47.
16. Dmitrienko M.A., Strizhak P.A. Coal-water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: an introductory review // Science of the Total Environment. – 2018. – V. 613–614. – P. 1117–1129.
17. Dmitrienko M.A., Strizhak P.A., Tsygankova Yu.S. Techno-economic analysis of prospects of use of organic coal-water fuels of various component compositions // Chemical and Petroleum Engineering. – 2017. – V. 53. – Iss. 3–4. – P. 195–202.
18. Nyashina G.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Energy efficiency and environmental aspects of the combustion of coal-water slurries with and without petrochemicals // Journal of Cleaner Production. – 2018. – V. 172. – P. 1730–1738.
19. Обосновывающие материалы к схеме теплоснабжения города Томска до 2031 года (актуализация на 2017 год). Книга 1. Существующее положение в сфере производства, передачи и потребления тепловой энергии для целей теплоснабжения. Приложение 1. Энергоисточники города. – Томск: Томская печатная компания, 2016. – 95 с.
20. Burning Properties of Slurry Based on Coal and Oil Processing Waste / D.O. Glushkov, S.Yu. Lyrschikov, S.A. Shevyrev, P.A. Strizhak // Energy & Fuels. – 2016. – V. 30. – Iss. 4. – P. 3441–3450.

*Поступила 12.04.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Курганкина М.А.**, аспирант, ассистент лаборатории моделирования процессов тепломассопереноса Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Вершинина К.Ю.**, кандидат физико-математических наук, ассистент лаборатории моделирования процессов тепломассопереноса Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Озерова И.П.**, кандидат технических наук, доцент Научно-образовательного центра им. И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Медведев В.В.**, кандидат технических наук, доцент Научно-образовательного центра им. И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 62–665.4

## THERMAL POWER PLANTS SWITCHING FROM TRADITIONAL FUELS TO COAL WATER SLURRIES CONTAINING PETROCHEMICALS

**Margarita A. Kurgankina**<sup>1</sup>,  
mad2@tpu.ru

**Kseniya Yu. Vershinina**<sup>1</sup>,  
vershininaks@gmail.com

**Irina P. Ozerova**<sup>1</sup>,  
ozer@tpu.ru

**Valeriy V. Medvedev**<sup>1</sup>,  
t45ap@tpu.ru

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the effective utilization of numerous accumulated coal waste and oil refining in the composition of coal water slurry and coal water slurry containing petrochemicals, a significant reduction in consumption of minerals for energy, minimizing the impact of heat energy on public health and the state of nature.

**The main aim** of the research is fuel supply systems transformation in switching thermal power plants from solid, liquid and gas fuel to coal water slurries containing petrochemicals; techno economic analysis of power generation facility switching to high-potential coal-water slurries containing petrochemicals based on coal and oil processing waste.

**Object** of the research is thermal power plant with electric and thermal capacity 300 MW and 800 Gcal-hr respectively located in the Siberian region of the Russian Federation, type of primary fuel used – coal and nature gas, type of starting fuel and used – fuel oil.

**Methods:** techno economic analysis of the efficiency of thermal power plant switching from traditional fuel to coal water slurry containing petrochemicals by calculating the fuel costs, operating costs, fuel storage costs, storing and disposal of bottom ash waste, payment of fines and environmental actions, fuel supply system costs.

**Results.** Thermal power plant switching from traditional fuel to coal water slurry containing petrochemicals greatly simplifies the fuel supply systems as much less equipment is required to create such systems. During the production of total installed capacity of all coal-fired power plants in the world due to the combustion of coal water slurry containing petrochemicals, the fuel costs saving can amount from hundreds of millions rubles up to tens of billions rubles in year.

### Key words:

Thermal power plant, fuel supply system, coal water slurry, coal water slurry containing petrochemicals, techno economic analysis, anthropogenic emissions.

The research was performed within the framework of the strategic plan for development of National Research Tomsk Polytechnic University as one of the world-leading universities (project VIU-ISHFVP-184/2018).

### REFERENCES

1. *Medium-Term Coal Market Report 2016*. Paris, International Energy Agency, 2016. 141 p.
2. *Coal information: overview*. Paris, International Energy Agency, 2017. 8 p.
3. Zykov A.M., Anichkov S.N., Kolchin K.I., Goncharenko G.V., Menchikov L.G., Korshevets I.K., Strel'tsova Ye.D., Leonova M.Yu. The problem of reducing mercury emissions from coal combustion at thermal power plants. *Energetik*, 2014, Iss. 3, pp. 69–70. In Rus.
4. *The US Coal Crash. Evidence for Structural Change*. London, Carbon Tracker Initiative, 2015. 48 p.
5. Liu J., Jiang X., Zhou L., Wang H., Han X. Co-firing of oil sludge with coal-water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler. *Journal Hazardous Materials*, 2009, vol. 167, Iss. 1–3, pp. 817–823.
6. Guttikunda S.K., Jawahar P. Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India. *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 92, pp. 449–460.
7. Taylasheva T.S., Krasilnikova L.G., Vorontsova E.S. Estimation of harmful emissions into the atmosphere from Tomsk region boiler plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 52–55. In Rus.
8. Krylov D.A. Microelements in fuel and ash and slag waste from coal-fired power plants. *Energetik*, 2012, Iss. 11, pp. 36–39. In Rus.
9. Murko V.I., Karpenok V.I., Senchurova Y.A., Tailakov O.V., Bogomolov A.R., Khyamyalyainen V.A. Results of study of sulfur oxide reduction during combustion of coal-water slurry fuel through use of sulfur capturing agents. *MATEC Web Conferences*, 2016, vol. 72, Article number 01074.
10. Murko V.I., Fedyayev V.I., Baranova M.P., Batmunkh S.T., Balandorz D.B., Sukhbaatar Ch.B. Technologies for obtaining and burning of coal-water slurries from Mongolian brown coals. *Energetik*, 2011, Iss. 4, pp. 35–38. In Rus.
11. Glushkov D.O., Syrodoy S.V., Zakharevich A.V., Strizhak P.A. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 148, pp. 224–235.
12. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal-water suspensions. *Fuel*, 2011, vol. 90, pp. 865–877.
13. Burdukov A.P., Popov V.I., Tomilov V.G., Fedosenko V.D. The rheodynamics and combustion of coal-water mixtures. *Fuel*, 2002, vol. 81, pp. 927–933.

14. Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals. *Journal Hazardous Materials*, 2017, vol. 338, pp. 148–159.
15. Khodakov G.S. Coal-water suspensions in power engineering. *Thermal Engineering*, 2007, vol. 54, Iss. 1, pp. 36–47.
16. Dmitrienko M.A., Strizhak P.A. Coal-water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: an introductory review. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 613–614, pp. 1117–1129.
17. Dmitrienko M.A., Strizhak P.A., Tsygankova Yu.S. Technoeconomic analysis of prospects of use of organic coal-water fuels of various component compositions. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2017, vol. 53, Iss. 3–4, pp. 195–202.
18. Nyashina G.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Energy efficiency and environmental aspects of the combustion of coal-water slurries with and without petrochemicals. *Journal of Cleaner Production*, 2018, vol. 172, pp. 1730–1738.
19. *Obosnovyuyushchie materialy k skheme teplosnabzheniya goroda Tomsk do 2031 goda (aktualizatsiya na 2017 god). Kniga 1. Sushchestvuyushchee polozhenie v sfere proizvodstva, peredachi i potrebleniya teplovoy energii dlya tseley teplosnabzheniya. Pri-lozheniye 1. Energoistchniki goroda* [Substantiating materials for heat supply system diagram of the Tomsk to 2031 (updated for 2017). B. 1. The current situation in production, transmission and consumption of thermal energy for the purposes of heat supply. Appendix 1. Power sources of Tomsk]. Tomsk, Tomskaya pechatnaya kompaniya Publ., 2016. 95 p.
20. Glushkov D.O., Lyrschikov S.Yu., Shevyrev S.A., Strizhak P.A. Burning Properties of Slurry Based on Coal and Oil Processing Waste. *Energy & Fuels*, 2016, vol. 30, Iss. 4, pp. 3441–3450.

Received: 12 April 2018.

#### Information about the authors

**Margarita A. Kurgankina**, postgraduate student, teaching assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Kseniya Yu. Vershinina**, Cand. Sc., senior teacher, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Irina P. Ozerova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Valeriy V. Medvedev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.46

## ФОНОВЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОД ВЕРХОВЫХ БОЛОТ В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Потапова Татьяна Михайловна<sup>1</sup>,  
ptm2000@mail.ru

Марков Михаил Леонидович<sup>2</sup>,  
2019mml@mail.com

Носаль Андрей Павлович<sup>3</sup>,  
Nosal\_AP@mail.ru

Савичев Олег Геннадьевич<sup>4</sup>,  
OSavichev@mail.ru

<sup>1</sup> Институт наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета,  
Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9.

<sup>2</sup> Государственный гидрологический институт,  
Россия, 199053, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 2-я линия, 23.

<sup>3</sup> Российский научно-исследовательский институт водного хозяйства,  
Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, 23.

<sup>4</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность работы.** Установление фоновых физико-химических и геохимических показателей болотных вод является необходимым этапом оценки допустимой антропогенной нагрузки на болота, в том числе допустимых сбросов загрязняющих веществ. Однако до последнего времени подобные сведения, полученные с учетом требований российского природоохранного законодательства, отсутствовали, что и обусловило актуальность исследования.

**Цель работы:** оценка фоновых показателей эколого-геохимического состояния вод верховых болот в таежной зоне.

**Методы исследования:** ландшафтно-геохимический и статистические методы, методы определения химического состава болотных вод.

**Результаты и выводы.** Выполнен анализ данных многолетних гидрохимических наблюдений на верховых болотах таежной зоны на территории Российской Федерации на примере трех типовых и наиболее изученных болот – Ламмин-Суо (Ленинградская область, среднетаежная подзона), Иласского (Архангельская область, северотаежная подзона) и Васюганского (восточный участок, Томская область, южнотаежная подзона). Выбраны характерные показатели состояния исследуемых болотных вод (рН, сумма главных ионов, содержание органических веществ по бихроматной окисляемости, концентрации фосфатов,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ) и определены фоновые значения. На этой основе установлены фоновые значения приоритетных физико-химических и геохимических показателей вод верховых болот на территории Российской Федерации для целей нормирования антропогенного воздействия на верховые болота. Показано, что фоновые значения в ряде случаев существенно больше установленных предельно допустимых концентраций в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного назначения. С учетом этого признаком антропогенного изменения состояния болотной экосистемы могут быть не только еще более высокие (по сравнению с фоновыми) фактические значения гидрохимических показателей, но и относительно заметные их колебания.

### Ключевые слова:

Верховые болота, Васюганское болото, Иласское болото, болото Ламмин-Суо, болотные воды, химический состав, фоновые показатели.

### Введение

Охрана и рациональное использование водных ресурсов является необходимым условием устойчивого социально-экономического развития, а соответствующие требования к водопользованию – важной составляющей природоохранного законодательства многих стран [1], в том числе Российской Федерации [2]. Эти требования распространяются и на болота – природные образования, согласно [3], занимающие часть земной поверхности и представляющие собой отложения торфа, насыщенные водой и покрытые специфической расти-

тельностью. При этом следует отметить, что болота в Российской Федерации отнесены к поверхностным водным объектам, которые состоят из поверхностных вод и покрытых ими земель в пределах береговой линии – границы водного объекта [2]. Однако у многих болот нет свободной поверхности. Напротив, поверхность многих болот покрыта древесной растительностью, что не характерно для остальных поверхностных водных объектов. Еще одна особенность – граница болот определяется по нулевой глубине залежи торфа [2], под которым, в свою очередь, понимается органическая горная по-

рода, образующаяся в условиях повышенного увлажнения при недостатке кислорода и содержащая не более 50 % минеральных компонентов на сухое вещество [4].

Тем не менее, при всей неоднозначности и несогласованности системы терминов и определений в области изучения и использования болот нет сомнений, что болота – сложные объекты окружающей среды, состояние которых является одновременно показателем, причиной и следствием целого комплекса физических и геохимических процессов [5]. Это определяет общую актуальность исследований болот, в том числе исследований способов нормирования антропогенных воздействий на болота.

В настоящее время достаточно детально проработаны вопросы оценки допустимого воздействия сбросов сточных вод в водоемы и водотоки [1, 6, 7]. Методика такой оценки, по сути, сводится к определению такой концентрации загрязняющего вещества в сточных водах  $C_{wst,lim}$ , при которой в контрольном створе отсутствует превышение относительно «гидрохимического фона» (если «фоновая» концентрация  $C_b$  меньше предельно допустимой  $C_{lim}$ ) или предельно допустимой концентрации  $C_{lim}$  (если  $C_b \geq C_{lim}$ ), что в общем случае соответствует условию [7]:

$$C_{wst,lim} = n(C_{lim}f(C) - C_b) + C_b, \quad (1)$$

где  $f(c)$  – функция трансформации вещества в водном объекте; в последние несколько лет на территории Российской Федерации принимается  $f(c)=1$ ;  $n$  – кратность разбавления, связанная с концентрациями вещества в сточных водах и исследуемом водном объекте уравнением (2):

$$n = \frac{C_{wst} - C_b}{C_{x,max} - C_b}, \quad (2)$$

где  $C_{wst}$  – концентрация вещества в сточных водах;  $C_{x,max}$  – максимальная концентрация вещества в контрольном створе.

Очевидно, что один из ключевых параметров уравнений (1, 2), определяющих эффективность нормирования сбросов загрязняющих веществ, – фоновая концентрация, под которой понимается расчетное значение концентрации химического вещества в створе, расположенном выше контролируемых источников этого вещества, полученное с учетом природных и антропогенных неблагоприятных условий [7]. Фактически расчет величины  $C_b$  сводится к оценке верхнего предела погрешности определения математического ожидания в период с наибольшими за год содержаниями вещества, которое, в свою очередь, определяется по зависимости от расхода воды или как среднее арифметическое (при отсутствии достоверной связи):

$$C_b = C_{a,mm} + \frac{t_\alpha \sigma}{\sqrt{M}}, \quad (3)$$

где  $C_{a,mm}$ ,  $\sigma$  и  $M$  – среднее арифметическое, среднее квадратическое отклонение и объем выборки за месяц (с возможностью расширения временного интервала за счет смежных интервалов, удовле-

творяющих условию статистической однородности) с наибольшими за год содержаниями исследуемого вещества;  $t_\alpha$  – коэффициент Стьюдента при уровне значимости  $\alpha=5\%$  [8].

Ряды гидрохимических наблюдений на болотах на территории Российской Федерации весьма ограничены, особенно в случае верховых болот, под которыми, согласно [4], понимаются торфяные болота с преобладанием залежи (не менее половины объема), сложенной торфами, образовавшимися преимущественно из растительности олиготрофного типа (в ботаническом составе верховых торфов не должно быть более 10 % остатков растительности евтрофного типа). Соответственно, существует ряд нерешенных вопросов методики определения фоновых концентраций растворенных, коллоидных и взвешенных веществ в водах верховых болот, в том числе связанных с определением наихудших гидрохимических и гидрологических условий на верховых болотах. Все это и определило цель исследования – оценку фоновых геохимических показателей болотных вод деятельного горизонта торфяной залежи верховых болот таежной зоны в пределах Российской Федерации, а также основные задачи в рамках обоснования методики определения фоновых геохимических показателей болотных вод верховых болот: 1) выявление периодов с наиболее высокими содержаниями веществ в болотных водах деятельного горизонта торфяной залежи и наихудшими гидрологическими условиями; 2) выявление веществ различного генезиса и обоснование перечня нормируемых показателей.

#### Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования выбраны наиболее изученные участки верховых болот, расположенных на территории Архангельской (Иласский болотный массив в северотаежной подзоне), Ленинградской (болото Ламмин-Суо в среднетаежной подзоне) и Томской области (Васюганский болотный массив в южно-таежной подзоне, восточный участок у с. Полянника Бакчарского района). На болотах Иласском и Ламмин-Суо в течение относительно длительного периода функционировали болотные посты. Там же проводились гидрохимические наблюдения специалистами Государственного гидрологического института (ГГИ) Росгидромета и Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ) [9–12]. На восточном участке Васюганского болотного массива в течение нескольких десятилетий проводятся комплексные геоботанические, гидрологические и геохимические исследования специалистами Сибирского научно-исследовательского института торфа (СибНИИТ), Томского государственного университета (ТГУ), Института мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН, Томского политехнического университета (ТПУ) и ряда других организаций [13–17]. Подробное описание исследуемых участков болот приведено в [9, 12, 14,

17]. Также привлекались опубликованные материалы гидрохимических обобщений по другим верховым болотам Северной Евразии [18–22].

Отбор проб болотных вод проводился из деятельного горизонта торфяной залежи с учетом требований [23, 24]. Отбирались пробы болотных вод не только с участков с преобладанием верховой торфяной залежи, но и переходной, поскольку верховые участки очень редко непосредственно граничат с суходолами. Соответственно, отбор проб в пределах переходных участков может привести к необъективной оценке фонового состояния именно верховых болот.

Обобщение данных производилось с учетом выбраковки экстремальных значений по методике [8] и при условии использования одинаковых или сопоставимых методов: рН – потенциометрический; концентрации  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_2$ , перманганатная (ПО) и бихроматная (БО) окисляемости – титриметрический;  $\text{SO}_4^{2-}$  – турбидиметрический;  $\text{Si}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , фосфаты, Fe – фотометрический, масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой с использованием масс-спектрометра NexION 300D;  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  – ионная хроматография; Zn, Cu, Al – инверсионно-вольтамперометрический, атомно-абсорбционный, масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой. Лабораторные работы выполнялись в аккредитованных лабораториях Санкт-Петербургского государственного (СПбГУ) и Томского политехнического (ТПУ) университетов, АО «Томскгео-мониторинг» по аттестованным методикам.

### Результаты исследования

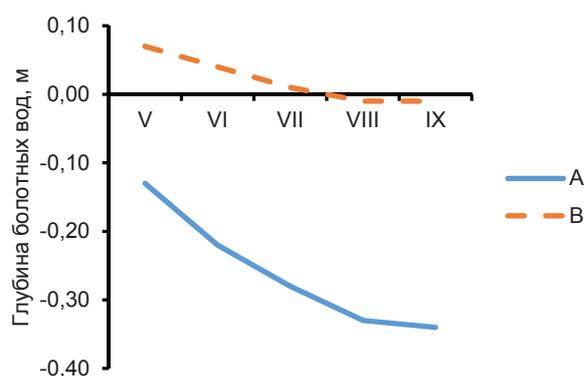
Воды деятельного горизонта изученных верховых болот в среднем за многолетний период – с малой и очень малой минерализацией, по величине рН – кислые и слабокислые, с повышенным содержанием органических веществ (ОВ) по перманганатной (ПО) и бихроматной (БО) окисляемости (табл. 1). Значительная часть ОВ представлена гуминовыми (ГК) и фульвокислотами (ФК) [17], вследствие чего достаточно сложно использовать существующие геохимические классификации, основанные на сравнении эквивалентных концентраций главных ионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ . Среди катионов обычно преобладает  $\text{Ca}^{2+}$ , а среди анионов –  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и ФК.

В течение года наиболее низкие значения рН и суммы главных ионов  $\Sigma_{mi}$  ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) в ряде случаев приурочены к весенне-летнему половодью, когда в болотные воды поступают кислые и слабокислые ультрапресные снеготалые воды и усиливается вынос органических кислот из деятельного горизонта торфяной залежи. Но аналогичные изменения могут происходить и в результате выпадения дождей в летне-осенний период и оттепелей в зимний. Во внутригодовом изменении концентраций органических и биогенных (соединения N, P, Si) веществ, железа и микроэлементов ярко выраженных тенденций в целом не выявлено, но также отмечена существен-

ная изменчивость в течение года и в различных внутриболотных экосистемах.

В качестве наиболее общей закономерности можно лишь отметить некоторое уменьшение геохимических показателей болотных вод при увеличении интенсивности водообмена. Например, для переходных участков окраины Васюганского болота у с. Полынянка, где в весенние месяцы уровень болотных вод, по данным Ю.А. Харанжевской [25], может быть выше средней поверхности болота (рисунок) и наблюдается сброс воды на границу с суходолом, отмечено более заметное, по сравнению в грядово-мочажинным комплексом (ГМК) и сосново-сфагново-кустарничковым болотом (региональное название – «рям»), уменьшение рН,  $\Sigma_{mi}$ , содержаний Si, Fe,  $\text{NH}_4^+$  (табл. 1).

При этом следует отметить, что воды деятельного горизонта верховых болот, по сравнению с соответствующими показателями переходных и низинных болот, отличаются наименьшими значениями рН, суммарного содержания главных ионов и наибольшими значениями окисляемости. Сопоставление материалов гидрохимических наблюдений на болотах Российской Федерации, в разной степени затронутых хозяйственной деятельностью, показало, что антропогенное воздействие на химический состав вод верховых болот связано, прежде всего: 1) с аварийными сбросами нефтегазоводяной эмульсии и минерализованных вод, используемых в системе поддержания пластового давления (ППД) при добыче и транспортировке углеводородов в Западной Сибири и на севере европейской территории Российской Федерации (ЕТР); 2) поверхностным и подповерхностным стоком с производственных территорий нефтегазодобывающих и нефтегазотранспортных предприятий.



**Рисунок.** Среднемесячные значения (1998–2003 гг.) глубины залегания болотных вод относительно средней поверхности Васюганского болота у с. Полынянка на участках преобладания внутриболотных экосистем: А) верховой сосново-сфагново-кустарничковой; В – переходной сфагново-осоковой топи (по данным Ю.А. Харанжевской [25])

**Figure.** Monthly average values (1998–2003) of bog water depths concerning average surface of the Vasyugan bog at Polynyanka settlement on sites of ecosystems: А) oligotrophic pine-sphagnum-shrub; В – mesotrophic pine-sphagnum-orchard (the data of Yu.A. Kharanzhevskaya [25])

**Таблица 1.** Средние арифметические значения физико-химических и геохимических показателей вод деятельного горизонта Васюганского и Иласского болот и погрешности их определения при уровне значимости 5 %

**Table 1.** Average values of physical, chemical and geochemical parameters of bog waters (active horizon) of the Vasyugan and the Ilasskoye bogs and an error of their definition for significance value 5 %

Болото Vog	Показатель Index	Объект Object	Весеннее половодье Spring flood	Летняя межень Summer low water	Осенний паводок Autumn rain flow	Летне-осенний период Summer-au- tumn period	Зимняя межень Winter low water	Год Year
Восточный участок Васюганского болота. Период наблюдений: 2003–2017 гг. Количество проб 32...52 Eastern part of the Vasyugan bog. Observation period: 2003–2017. Number of samples 32–52	рН	ПУ MSOB	3,89±0,12	–	–	4,70±0,89	4,02±0,61	4,24±0,39
		Рям гуам	3,95±0,13	–	–	4,49±0,32	4,28±0,34	4,31±0,26
		ГМК HRC	–	–	–	5,25±0,59	4,73±0,36	4,89±0,39
	$\Sigma_{ми}$ , мг/дм <sup>3</sup> mg/dm <sup>3</sup>	ПУ MSOB	16,3±10,3	–	–	31,5±14,3	19,7±5,80	22,8±5,80
		Рям гуам	21,8±9,6	–	–	20,8±4,8	19,4±3,4	20,3±2,7
		ГМК HRC	–	–	–	30,5±3,0	22,3±5,3	24,8±3,9
	Cl <sup>-</sup> , то же	ПУ MSOB	1,2±0,1	–	–	2,5±0,6	2,7±0,9	2,4±0,5
		Рям гуам	1,7±0,6	–	–	2,0±0,4	0,7±0,7	2,1±0,5
		ГМК HRC	–	–	–	1,9±0,7	1,6±0,6	1,7±0,5
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , -//-	ПУ MSOB	2,870±0,639	–	–	4,428±2,494	5,692±2,887	4,932±1,467
		Рям гуам	4,328±1,360	–	–	3,695±1,721	4,625±1,971	4,197±1,820
		ГМК HRC	–	–	–	1,393±0,078	3,022±2,788	2,534±1,854
	P*, -//-	ПУ MSOB	0,017±0,015	–	–	0,020±0,015	0,083±0,098	0,055±0,049
		Рям гуам	0,019±0,011	–	–	0,032±0,016	0,083±0,044	0,067±0,033
		ГМК HRC	–	–	–	0,018±0,011	0,092±0,073	0,070±0,052
	Si, -//-	ПУ MSOB	1,61±1,23	–	–	2,82±0,69	5,62±1,84	4,14±1,09
		Рям гуам	3,89±3,15	–	–	2,61±0,66	3,57±0,65	3,37±0,67
		ГМК HRC	–	–	–	2,33±0,77	2,86±0,87	2,70±0,69
	Fe, -//-	ПУ MSOB	1,317±0,509	–	–	2,431±1,218	2,551±0,822	2,367±0,539
		Рям гуам	2,003±0,510	–	–	2,096±0,347	1,759±0,488	1,810±0,342
		ГМК HRC	–	–	–	2,310±0,270	1,328±0,474	1,622±0,430
	Al, мкг/дм <sup>3</sup> mkg/dm <sup>3</sup>	ПУ MSOB	–	–	–	294,9±102,1	750,4±668,8	627,6±482,7
		Рям гуам	–	–	–	236,2±105,8	537,6±185,7	494,5±160,3
		ГМК HRC	–	–	–	284,8±20,7	762,3±430,6	656,2±335,8
	Cu, то же	ПУ MSOB	–	–	–	1,1±0,4	3,7±1,45	2,6±1,0
		Рям гуам	–	–	–	2,9±0,9	4,8±2,0	4,2±1,4
		ГМК HRC	–	–	–	1,5±0,3	3,7±1,9	3,1±1,4
Zn, -//-	ПУ MSOB	–	–	–	17,3±7,0	53,7±31,9	36,2±19,7	
	Рям гуам	–	–	–	21,2±2,5	37,8±12,5	31,7±9,5	
	ГМК HRC	–	–	–	17,2±3,7	69,0±50,1	53,5±25,4	
ПО, мгО/дм <sup>3</sup> РО, мгО/дм <sup>3</sup>	ПУ MSOB	48,87±3,90	–	–	102,51±41,58	96,58±19,89	93,07±16,71	
	Рям гуам	88,20±4,56	–	–	97,59±14,88	100,74±10,50	96,48±8,31	
	ГМК HRC	–	–	–	136,11±54,11	92,86±12,83	105,84±29,46	
БО, мгО/дм <sup>3</sup> ДО, мгО/дм <sup>3</sup>	ПУ MSOB	75,25±6,28	–	–	248,93±167,88	170,78±20,88	185,25±61,64	
	Рям гуам	110,53±13,52	–	–	158,95±41,39	163,51±23,47	152,44±22,61	
	ГМК HRC	–	–	–	278,73±2,64	123,19±43,56	169,85±108,84	
Иласский болотный массив. Период наблюдений: 1993–2015 г. Количество проб – 30–50 The Ilasskoye bog. Observation period: 1993–2015. Number of samples 30–50	рН	ГМК HRC	4,50±0,11	4,45±0,07	4,36±0,08	–	4,29±0,09	4,38±0,08
	$\Sigma_{ми}$ , мг/дм <sup>3</sup> mg/dm <sup>3</sup>		27±2,2	29±2,4	25±1,8	–	29±6,3	26±3,2
	Cl <sup>-</sup> , то же		5,3±1,6	4,2±1,3	4,0±1,5	–	4,7±1,7	4,5±1,3
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , -//-		0,30±0,12	0,20±0,08	0,10±0,05	–	0,20±0,07	0,16±0,09
	P*, -//-		0,015±0,010	0,023±0,014	0,015±0,011	–	0,025±0,012	0,020±0,013
	Si, -//-		2,30±0,23	2,05±0,26	2,53±0,39	–	1,13±0,14	1,95±0,23
	Fe, -//-		2,07±0,23	3,12±0,15	3,10±0,17	–	1,83±0,25	2,62±0,27
	БО, мгО/дм <sup>3</sup> ДО, мгО/дм <sup>3</sup>		193±53	240±47	203±31	–	172±29	199±33

**Таблица 2.** Средний химический состав вод жидкой фракции шламовых амбаров и хозяйственно-бытовых сточных вод в пределах заболоченных территорий Сибири [26], мг/дм<sup>3</sup>

**Table 2.** Average chemical composition of liquid fraction of waste products of oil wells drilling and sewage within the limits of boggy territories of Siberia [26], mg/dm<sup>3</sup>

Показатель Index	Шламовые амбары Waste product of drilling	Хозяйственно- бытовые стоки Sewage
pH (единицы pH) units pH	8,00±0,59	7,59±0,06
$\Sigma_{mi}$	7211,8±1436,7	830,8±79,3
Ca <sup>2+</sup>	248,4±115,1	68,6±6,7
Mg <sup>2+</sup>	31,8±7,7	18,7±3,3
Na <sup>+</sup>	2124,8±1344,1	82,2±13,0
K <sup>+</sup>	202,2±142,7	11,6±1,6
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	338,3±106,1	536,4±21,8
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	3,8±2,3	–
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	388,1±313,3	34,1±3,8
Cl <sup>-</sup>	3874,4±2291,8	79,2±9,3
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4,96±1,72	2,57±0,42
NO <sub>2</sub>	0,026±0,017	0,247±0,045
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1,60±0,54	45,54±3,68
Фосфаты Phosphates	0,68±0,30	4,68±0,71
Si	7,32±2,03	11,71±1,57
БО/DO	364,69±57,61	278,10±60,55
Нефтепродукты Oil products	0,511±0,108	1,579±0,546
Fe	19,277±11,740	2,852±0,459
Cu	0,0072±0,0046	0,0059±0,0010
Zn	0,0336±0,0170	0,0116±0,0028

Эти два вида воздействий обусловлены размещением огромного количества подобных объектов, либо промышленных и магистральных нефте- и газопроводов именно на болотах. Сброс иных производственных или хозяйственно-бытовых стоков на болота возможен (например, сброс производственных сточных вод при предполагаемой добыче ос-

адочных железных руд), но он преимущественно осуществляется на низинных или переходных болотах. Также возможно выпадение загрязняющих веществ из атмосферного воздуха с атмосферными осадками и путем сухого осаждения, но отличить такой вид воздействия от последствий выщелачивания и растворения в болотной среде частиц атмосферного аэрозоля природного происхождения чрезвычайно сложно, принимая во внимание погрешности используемых в настоящее время методов отбора и анализа проб.

Сравнение показателей химического состава сточных [26] и болотных вод показало, что, во-первых, сточные воды (и производственные, и хозяйственно-бытовые), фактически или потенциально поступающие в верховые болота северных регионов, содержат (могут содержать) значительно больше растворенных солей по сухому остатку, натрия, хлоридов, сульфатов, фосфатов и ионов аммония, а pH стоков часто заметно больше, чем в болотных водах. Содержания прочих изученных веществ в сточных водах сопоставимы с соответствующими показателями болотных вод (табл. 2).

#### Обсуждение результатов исследования

Анализ полученных материалов показал, что в качестве расчетного периода для определения фоновых геохимических показателей вод непосредственно верховых болот может быть использован весь годичный интервал. В случае переходных и низинных болот возможно использование менее продолжительного интервала с наиболее высокими значениями геохимических показателей, например зимней и летне-осенней межени при расчете фоновых содержаний  $\Sigma_{mi}$  и весенне-летнего паводья при оценке фоновых значений pH.

Однако при этом следует отметить, что, во-первых, повышение уровней болотных вод на несколько сантиметров не является показателем улучшения показателей их качества. Во-вторых, геохимические показатели болотных вод практически всегда заметно больше предельно-допустимых зна-

Примечание: прочерк означает отсутствие данных, количество проб менее трёх или отсутствие привязки к паводкам (выделением характерных подпериодов внутри летне-осеннего периода); ПУ – переходный участок на окраине верхового болота; рям – верховое сосново-сфагново-кустарничковое болото; ГМК – верховой грядово-мочажинный комплекс;  $\Sigma_{mi}$  – сумма главных ионов (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>); P\* – фосфор фосфатов; ПО – перманганатная окисляемость; БО – перманганатная окисляемость; в таблице приведены значения среднего арифметического и погрешностей их расчета  $\delta$ , определяемых по формуле:

$\delta = \frac{t_{\alpha} \sigma}{\sqrt{M}}$ , где  $\sigma$  и  $M$  – среднее квадратичное отклонение и объем выборки;  $t_{\alpha}$  – коэффициент Стьюдента при уровне значимости  $\alpha=5\%$  [8].

Note: the crossed out section means absence of the data or quantity of samples less than three; MSOB is the mesotrophic border of an oligotrophic bog; ryam (Russian) is the oligotrophic, pine-shrub-sphagnum bog; HRC is the hollow-ridge complex – mire type which combines low elongated ridges and hollows between them;  $\Sigma_{mi}$  is the sum of concentration of the main ions (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>); P\* is the phosphorus of phosphates; PO is the permanganate oxidability (chemical oxygen consumption with potassium permanganate/permanganate index); DO is the dichromate oxidability; in the table the values of average arithmetic and errors of their defini-

tion  $\delta$ , determined under the formula are resulted:  $\delta = \frac{t_{\alpha} \sigma}{\sqrt{M}}$ , where  $\sigma$  и  $M$  are the standard deviation and the volume of sample;  $t_{\alpha}$  is the Student factor for significance value 5 % [8].

чений, установленных для хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного водопользования. Это происходит уже без каких-либо признаков антропогенного воздействия на болото, поскольку необходимым признаком болота, согласно [3, 4], является наличие торфа и болотных вод. Соответственно, болотные воды по определению всегда содержат большое количество ОВ, продуктов их разложения (например,  $\text{NH}_4^+$  и  $\text{NO}_2^-$ ) и взаимодействия органических веществ с металлами. Так, в составе ОВ торфяных болот на территории Российской Федерации, включая Васюганское болото, выделены фракции гуминовых кислот, связанные с кальцием [14], а исследования форм миграции химических элементов в торфах, минеральных почвах и природных водах в разных регионах мира позволили ряду авторов сделать вывод о нахождении значительной части тяжелых металлов и редкоземельных элементов в виде соединений с ФК и фосфатами [27–30].

Наиболее распространенное (фактически или потенциально) химическое воздействие на воды верховых болот на территории Российской Федерации связано с деятельностью нефтегазодобывающих и нефтегазотранспортных предприятий, в результате которой в болота могут поступать нефтепродукты и соленые воды системы поддержания

пластового давления. Способ поступления – преимущественно при авариях, либо с поверхностным стоком с производственных площадок. Идентификация такого загрязнения может быть достаточно эффективно проведена путем определения БО, сухого остатка и ионов  $\text{Cl}^-$ . Последний показатель является достоверным показателем и хозяйственно-бытового загрязнения (повышенное содержание в стоках поваренной соли и дезинфекция стоков с использованием хлора или гипохлорита натрия).

С учетом указанных выше фактов целесообразно максимально широкое определение фоновых значений следующих показателей вод верховых болот: 1) для идентификации загрязнения – рН, минерализация болотных вод по сухому остатку или сумме главных ионов (в предположении, что при определении сухого остатка теряется около половины содержания  $\text{HCO}_3^-$ , но возможно дополнительное увеличение суммы солей за счет остатков трудноокисляемых органических веществ), бихроматная окисляемость БО, концентрации  $\text{Cl}^-$ ; 2) для оценки эффективности восстановления нарушенных верховых болот – рН, минерализация по сухому остатку или  $\Sigma_{\text{ми}}$ , БО. Анализ на нефтепродукты, видимо, следует проводить при обследовании шламовых амбаров и мест аварий на нефте- и газопроводах. Прочие вещества исследуются при дополни-

**Таблица 3.** Фоновые значения показателей вод деятельного горизонта тестовых верховых болот и погрешности их определения при уровне значимости 5 %

**Table 3.** Background values of parameters of bogs active horizon waters and errors of their definition at significance value 5 %

Показатель Index	Экосистема Ecosystem	Болотный массив Ламмин-Суо The Lammine-Sua bog	Иласский болотный массив The Ilasskoye bog	Восточный участок Васюганского болота East site of the Vasyugan bog	Обобщенные фоновые значения Result
рН	Рям/Ryam	4,08±0,12	–	4,31±0,26	4,35±0,17
	ГМК/HRC	4,80±0,16	4,38±0,08	4,89±0,39	
$\Sigma_{\text{ми}}$ , мг/дм <sup>3</sup> mg/dm <sup>3</sup>	Рям/Ryam	18,0±3,5	–	20,3±2,7	25±3,5
	ГМК/HRC	21,0±4,7	26±3,2	24,8±3,9	
$\text{Cl}^-$ , то же	Рям/Ryam	4,0±1,5**	–	2,1±0,5	3,1±1,2
	ГМК/HRC		4,5±1,3	1,7±0,5	
$\text{NH}_4^+$ , –//–	Рям/Ryam	1,10±0,76	–	4,20±1,82	1,65±1,23
	ГМК/HRC		0,16±0,09	2,53±1,85	
P*, –//–	Рям/Ryam	0,01±0,009	–	0,067±0,033	0,05±0,03
	ГМК/HRC		0,020±0,013	0,070±0,052	
Si, –//–	Рям/Ryam	–	–	3,37±0,67	2,42±0,53
	ГМК/HRC		1,95±0,23	2,70±0,69	
Fe, –//–	Рям/Ryam	0,51±0,23	–	1,81±0,34	1,96±0,74
	ГМК/HRC		1,32±0,54	1,62±0,43	
Cu, то же	Рям/Ryam	4,5±1,7	–	4,2±1,4	3,8±1,2
	ГМК/HRC		4,4±1,6	3,1±1,4	
Zn, –//–	Рям/Ryam	22,5±6,8	–	31,7±9,5	37,6±15,4
	ГМК/HRC		33,5±15,2	53,5±25,4	
БО, мгО/дм <sup>3</sup> DO, mg/dm <sup>3</sup>	Рям/Ryam	140±56	–	152±23	160±32
	ГМК/HRC		199±33	170±109	

Примечания: \*Фоновые значения получены как обобщенные среднемноголетние значения основных компонентов химического состава болотных вод для трех болотных массивов; \*\*приведены среднемноголетние значения по всем исследованным болотным микроландшафтам, включая рям и ГМК.

Notes: \*Background values are received as average values for three bogs; \*\*average values on all investigated bog ecosystems are resulted.

тельном обосновании нормативов антропогенного воздействия на болота и природоохранных мероприятий. Фоновые значения гидрохимических показателей вод болот Ламмин-Суо, Иласского и Васюганского, вычисленные по уравнению (3) для годового интервала в целом, приведены в табл. 3.

Сопоставление полученных фоновых характеристик исследованных верховых болот показало, что, во-первых, в водах олиготрофных болот, территориально удаленных друг от друга, диапазоны колебаний основных гидрохимических показателей (рН,  $\Sigma_{mi}$ , содержания главных ионов и органических веществ по БО) находится в близких пределах и их различия с учетом погрешности определения не являются статистически значимыми. При этом средние величины общей минерализации вод (по  $\Sigma_{mi}$ ) исследованных болот варьируют в достаточно узком интервале и соответствуют водам с очень малой минерализацией (не более 30 мг/дм<sup>3</sup>). Значения рН обычно изменяются в диапазоне 4,08–4,89 и в целом соответствуют кислым водам. Значения бихроматной окисляемости изменяются в пределах 140–199 мгО/дм<sup>3</sup>, что позволяет отнести воды верховых болот к категории высокоумифицированных вод.

Во-вторых, анализ рассмотренных выборок на однородность с использованием критериев Стьюдента и Фишера (при уровне значимости 5 %) показал, что данные по верховым болотам: Иласскому, Васюганскому (восточный участок) и Ламмин-Суо, в целом статистически однородны, что позволило объединить три выборки в одну и определить обобщенные фоновые значения физико-химических и геохимических показателей вод верховых болот. С учетом репрезентативности изученных верховых болот эти данные могут быть использова-

ны для оценки допустимого воздействия на верховые болота на всей территории Российской Федерации в пределах таежной зоны.

#### Заключение

В результате анализа многолетних гидрохимических наблюдений на болотах Архангельской, Ленинградской и Томской областей определены: 1) перечень приоритетных показателей эколого-геохимического состояния вод верховых болот, отражающих основные природные и антропогенные условия формирования их химического состава (рН, минерализация по сумме главных ионов  $\Sigma_{mi}$ , органические вещества по бихроматной окисляемости, концентрации фосфатов,  $\text{NH}_4^+$ , Fe, Si, Al, Cu, Zn); 2) фоновые значения приоритетных физико-химических и геохимических показателей вод верховых болот, пригодные для нормирования антропогенных воздействий на верховые болота таежной зоны на территории Российской Федерации.

Фоновые значения показателей эколого-геохимического состояния вод верховых болот существенно больше установленных предельно допустимых концентраций в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и рыбохозяйственного назначения. С учетом этого признаком антропогенного изменения состояния болотной экосистемы могут быть не только еще более высокие их фактические значения, но и относительно заметные колебания. Например, концентрации  $\text{Cl}^-$ , превышающие фон в три и более раза, могут свидетельствовать о сбросе подсланевых вод на нефтепромыслах; рН более 6 – об изменении трофности болота (в результате загрязнения, осушения, изменения водного режима) и так далее.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Loucks D.P., Van Beek E. Water Resources Systems Planning and Management. An introduction to Methods, Models and Applications. – Turin: UNESCO, 2005. – 680 p.
2. Водный кодекс Российской Федерации (с изменениями на 29.07.2017 г.). Принят Гос. Думой 12.04.2006 г. Одобрен Советом Федерации 26.05.2006 г. – М.: Кремль, 2006. – 47 с.
3. ГОСТ 19179–73. Гидрология суши. Термины и определения. Дата введения 01.01.1975 г. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 65 с.
4. ГОСТ 21123–85. Торф. Термины и определения. Дата введения 01.07.1986 г. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 85 с.
5. Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status / S. Hu, Zh. Niu, Y. Chen, L. Li, H. Zhang // Science of the Total Environment. – 2017. – V. 586. – P. 319–327. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.001> 0048–9697 (accessed 31 October 2017).
6. Benedini M., Tsakiris G. Water Quality Modelling for Rivers and Streams. – Dordrecht: Springer, 2013. – 288 p.
7. Методика разработки нормативов допустимых сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты для водопользователей (с изменениями от 29.07.2014 г.). Утв. Приказом Мин. природных ресурсов России от 17.12.2007 г. № 333. – М.: МПР России, 2014. – 35 с.
8. РД 52.24.622–2017. Порядок проведения расчета условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов сбросов сточных вод. Дата введения 14.06.2017 г. – М.: Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2017. – 96 с.
9. Калужный И.Л., Лавров С.А., Романюк К.Д. Водные ресурсы и режим водных объектов изменения водного режима болот Севера и Северо-Запада России под влиянием климатических факторов // Водные ресурсы. – 2012. – Т. 39. – № 1. – С. 13–25.
10. Калужный И.Л., Левандовская Л.Н. Гидрохимический режим и химический состав вод олиготрофных болотных массивов // Труды ГГИ. – 1974. – Вып. 222. – С. 99–118.
11. Потапова Т.М., Новиков С.М. Оценка антропогенных изменений химического состава болотных вод и стока растворенных веществ с территории естественных и мелиорированных верховых болот // Вестник СПбГУ. – 2006. – Сер. 7. – Вып. 2. – С. 85–95.
12. Потапова Т.М. Основные факторы формирования химического состава вод немелиорированных олиготрофных болот // Гидрохимические материалы. – 1991. – Т. 110. – С. 3–16.
13. Imisheva L.I. Vasyugan mire. Natural conditions, structure and functioning. – Tomsk: Tomsk state ped. univ., 2011. – 158 p.
14. Савичева О.Г., Инишева Л.И. Биологическая активность торфяных болот // Сибирский экологический журнал. – 2000. – № 5. – С. 607–614.

15. Inisheva L.I., Golovchenko A.V., Szajdak L.W. Distribution of organic compounds in the system of geochemically linked mires (the spurs of Vasuygan mire) // *Biogenic-Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems. Lecture Notes in Earth System Sciences.* – Switzerland: Springer, 2016. – P. 289–307.
16. Иванова Е.С., Харанжевская Ю.А., Миронов А.А. Латеральное распределение и миграция химических элементов в водах болот бассейнов рек Бакчар и Икса (Западная Сибирь) // *Вестник Московского университета. Серия 5: География.* – 2017. – № 4. – С. 55–64.
17. Савичев О.Г., Мазуров А.К. Временные изменения химического состава вод в восточной части Васюганского болота (Западная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 38–48.
18. Московченко Д.В. Биогеохимические особенности верховых болот Западной Сибири // *География и природные ресурсы.* – 2006. – № 1. – С. 63–70.
19. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / под редакцией С.М. Новикова. – СПб.: ВВМ, 2009. – 536 с.
20. Eurasian Mires of the Southern Taiga Belt: Modern Features and Response to Holocene Palaeoclimate / T. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies.* V. 190 / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – P. 315–341.
21. Kolpakova M.N., Naymushina O.S. Zonal Features of Bog and Lake Water Chemistry Along a Transect from Boreal to Arid Landscapes in The South of Western Siberia, Russia // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* – 2016. – V. 44. – P. 1–6.
22. Transformation of organo-ferric peat colloids by a heterotrophic bacterium / O.V. Oleinikova, L.S. Shirokova, O.S. Pokrovsky, O.Y. Drozdova, S.A. Lapitskiy, A.Y. Bychkov, E. Gérard // *Geochimica et cosmochimica acta.* – 2017. – V. 205. – P. 313–330.
23. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 8. Гидрометеорологические наблюдения на болотах. Изд. 3-е. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 360 с.
24. Weight W.D. *Hydrogeology Field Manual.* 2-nd ed. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.
25. Харанжевская Ю.А. Подземный сток бассейна р. Чая (западная Сибирь) и его многолетняя изменчивость: автореф. дис. ... канд. наук. – Томск, 2011. – 20 с.
26. Савичев О.Г., Бернатонис П.В., Бернатонис В.К. Геохимические условия размещения и утилизации отходов бурения в торфяно-болотных геосистемах Сибири // *Вестник Томск. гос. ун-та.* – 2013. – № 375. – С. 183–186.
27. Ephraim J.H., Allard B. *Metal Ion Binding by Humic Substances // Modelling in Aquatic Chemistry / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech.* – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 207–244.
28. Solubility, Mobility, and Bioaccumulation of Trace Elements: Abiotic Processes in the Rhizosphere / B. Robinson, N. Bolan, S. Mahimairaja, B. Clothier // *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation / edited by M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan.* – New York, USA: Taylor & Francis Group, 2006. – P. 97–110.
29. In situ porewater uranium concentrations in a contaminated wetland: Effect of seasons and sediment depth / D.I. Kaplan, S.W. Buettner, Li Dien, Huang Shan, P.G. Koster van Groos, P.R. Jaffe, J.C. Seaman // *Applied Geochemistry.* – 2017. – V. 85. – P. 128–136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.11.017> 0883–292 (дата обращения 31.10.2017).
30. Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia / S.I. Arbuzov, S.G. Maslov, R.B. Finkelman, A.M. Mezhibor, S.S. Ilenok, M.G. Blokhin, E.V. Peregudina // *Journal of Geochemical Exploration.* – 2018. – V. 184. – P. 40–48.

Поступила 29.05.2018 г.

#### Информация об авторах

**Потапова Т.М.**, кандидат химических наук, доцент Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета.

**Марков М.Л.**, кандидат географических наук, руководитель отдела экспериментальных гидрологических исследований и математического моделирования Государственного гидрологического института.

**Носаль А.П.**, доктор географических наук, заведующий отделом гидроэкологических исследований Российского научно-исследовательского института водного хозяйства.

**Савичев О.Г.**, доктор географических наук, профессор Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.46

## BACKGROUND PARAMETERS OF ECOLOGICAL AND GEOCHEMICAL CONDITION OF WATERS OF OLIGOTROPHIC BOGS IN THE TAIGA ZONE IN THE RUSSIAN FEDERATION

Tatyana M. Potapova<sup>1</sup>,

ptm2000@mail.ru

Mikhail L. Markov<sup>2</sup>,

2019mml@mail.com

Andrey P. Nosal<sup>3</sup>,

Nosal\_AP@mail.ru

Oleg G. Savichev<sup>4</sup>,

OSavichev@mail.ru

<sup>1</sup> St.-Petersburg State University,  
7/9, Universitetskaya embankment, Saint Petersburg, 199034, Russia.

<sup>2</sup> State Hydrological Institute,  
23, Vasilyevsky Island, 2<sup>nd</sup> line, Saint Petersburg, 199053, Russia.

<sup>3</sup> Russian Scientific Research Institute of Water Management,  
23, Mira street, Ekaterinburg, 620049, Russia.

<sup>4</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance.** Definition of background physical, chemical and geochemical parameters of bog waters is a necessary stage in determining allowable anthropogenous loading on bogs, including allowable dumps of polluting substances. However, until recently similar data were absent that determines the relevance of this research.

**The aim** of the research is to define the background parameters of ecological and geochemical condition of bog waters in taiga zone.

**Methods:** landscape-geochemical and statistical methods, methods of determining chemical composition of bog waters.

**Results and conclusions.** The authors have analyzed the data on chemical composition of oligotrophic bogs of taiga zone in the territory of the Russian Federation by the example of three typical and the most studied bogs – Lammine-Suo (Leningrad region, middle taiga subzone), Ilaskoye (Arkhangelsk region, northern taiga subzone) and Vasyuganskoye (east site, Tomsk region, southern taiga subzone). The characteristic parameters of condition of the researched bog waters (pH, the sum of the main ions, dichromate oxidability, concentration of phosphates,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , Fe, Al, Cu, Zn) were chosen and background values were determined. Considering these data, the background values of priority physical, chemical and geochemical parameters of oligotrophic bog waters were established on territories of the Russian Federation for normalization of anthropogenous influence on bogs. The background values in some cases are essentially higher than the established maximum permissible concentrations in water bodies for economic and drinking assignment and fish economy. Considering this fact, higher actual values and even rather appreciable fluctuations of these parameters may be the attribute of anthropogenous change of bog ecological system condition.

### Key words:

Oligotrophic bogs, the Vasyuganskoye bog, the Ilaskoye bog, the Lammine-Suo bog, bog waters, chemical composition, background parameters.

### REFERENCES

1. Loucks D.P., Van Beek E. *Water Resources Systems Planning and Management. An introduction to Methods, Models and applications*. Turin, UNESCO, 2005. 680 p.
2. *Vodny kodeks Rossiyskoy Federatsii* [Water Code of the Russian Federation]. Changes at 29.07.2017. Moscow, Kremlin, 2006. 47 p.
3. *GOST 19179–73. Gidrologiya sushy. Terminy i opredeleniya* [State Standard 19179–7. Hydrology of land. Terms and definitions]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1988. 65 p.
4. *GOST 21123–85. Torf. Terminy i opredeleniya* [State Standard 21123–85. Peat. Terms and definitions]. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1985. 85 p.
5. Hu S., Niu Zh., Chen Y., Li L., Zhang H. Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 586, pp. 319–327. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.001> 0048–9697 (accessed 31 October 2017).
6. Benedini M., Tsakiris G. *Water Quality Modelling for Rivers and Streams*. Dordrecht, Springer, 2013. 288 p.
7. *Metodika razrabotki normativov dopustimykh sbrosov veshchestv i mikroorganizmov v vodnyye obyekty dlya vodopolzovateley* [Methodology for developing standards for permissible discharges of substances and microorganisms into water bodies for water users]. 17.12.2007. № 333. Moscow, Ministry of Nature Resources of Russia, 2014. 35 p.
8. RD 52.24.622–2017. *Poryadok provedeniya rascheta usloynykh fonovykh kontsentratsiy khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh obyektoy dlya ustanovleniya normativov sbrosov stochnykh vod* [Procedure for calculating the background concentrations of chemicals in water bodies for establishing for wastewater discharges]. 14.06.2017. Moscow, Rostov-na-Donu, Rosgidromet, FGBU «SCHI» Publ., 2017. 96 p.

9. Kalyuzhny I.L., Lavrov S.A., Romanyuk K.D. Water resources and the regime of water bodies for changing the water regime of the marshes of the North and North-West of Russia under the influence of climatic factors. *Water resources*, 2012, vol. 39, no. 1, pp. 13–25. In Rus.
10. Kalyuzhny I.L., Levandovskaya L.N. Gidrokhimicheskiy rezhim i khimicheskiy sostav vod oligotrofnykh bolotnykh massivov [Hydrochemical regime and chemical composition of waters of oligotrophic bog massifs]. *Trudy GGI*, 1974, vol. 222, pp. 99–118.
11. Potapova T.M., Novikov S.M. Assessment of anthropogenic changes in the chemical composition of wetlands and the flow of dissolved substances from the territory of natural and reclaimed upland bogs. *Vestnik SPbGU*, 2006, Ser. 7, vol. 2, pp. 85–95. In Rus.
12. Potapova T.M. The main factors of the formation of the chemical composition of the waters of non-meliorated oligotrophic bogs. *Gidrokhimicheskiye materialy*, 1991, vol. 110, pp. 3–16. In Rus.
13. Inisheva L.I. *Vasyugan mire. Natural conditions, structure and functioning*. Tomsk, Tomsk state ped. univ., 2011. 158 p.
14. Savicheva O.G., Inisheva L.I. Biologicheskaya aktivnost torfyanykh bolot [Biological activity of peat bogs]. *Contemporary Problems of Ecology*, 2000, no. 5, pp. 607–614.
15. Inisheva L.I., Golovchenko A.V., Szajdak L.W. Distribution of organic compounds in the system of geochemically linked mires (the spurs of Vasyugan mire). *Biogenic-Abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems. Lecture Notes in Earth System Sciences*. Switzerland, Springer, 2016. pp. 289–307.
16. Ivanova Ye.S., Kharanzhevskaya Yu.A., Mironov A.A. Lateral distribution and migration of chemical elements in the waters of the swamps of the basins of the Bakchar and Iksha rivers (Western Siberia). *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2017, no. 4, pp. 55–64. In Rus.
17. Savichev O.G., Mazurov A.K. Changes of chemical composition of waters in East Part of the Vasyugan Mire (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 38–48. In Rus.
18. Moskovchenko D.V. Biogeochemical features of the upper marshes of Western Siberia. *Geography and Natural Resources*, 2006, no. 1, pp. 63–70. In Rus.
19. *Gidrologiya zabolochennykh territoriy zony mnogoletney merzloty Zapadnoy Sibiri* [Hydrology of wetlands in the permafrost zone of Western Siberia]. Ed. by S.M. Novikov. St-Petersburg, VVM Publ., 2009. 536 p.
20. Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian Mires of the Southern Taiga Belt: Modern Features and Response to Holocene Palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Vol. 190. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. pp. 315–341.
21. Kolpakova M.N., Naymushina O.S. Zonal Features of Bog and Lake Water Chemistry Along a Transect from Boreal to Arid Landscapes in The South of Western Siberia, Russia. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 44, pp. 1–6.
22. Oleinikova O.V., Shirokova L.S., Pokrovsky O.S., Drozdova O.Y., Lapitskiy S.A., Bychkov A.Y., Gérard E. Transformation of organo-ferric peat colloids by a heterotrophic bacterium. *Geochimica et cosmochimica acta*, 2017, vol. 205, pp. 313–330.
23. *Nastavlenie gidrometeorologicheskim stantsiyam i postam. Vol. 8. Gidrometeorologicheskie nablyudeniya na bolotakh* [Manual for hydrometeorological stations and posts. Iss. 8. Hydrometeorological observations in swamps]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 360 p.
24. Weight W.D. *Hydrogeology Field Manual*. 2-nd ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
25. Kharanzhevskaya Yu.A. *Podzemnyy stok basseyna r. Chaya (Zapadnaya Sibir) i ego mnogoletnyaya izmenchivost*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Ground flow of the Chaya river basin (Western Siberia) and its long-term variability. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2011. 20 p.
26. Savichev O.G., Bernatonis P.V., Bernatonis V.K. Geochemical conditions of location and utilization of drilling wastes in peat-bog geosystems of Siberia. *Vestnik Tomsk. gos. un-ta*, 2013, no. 375, pp. 183–186. In Rus.
27. Ephraim J.H., Allard B. Metal Ion Binding by Humic Substances. *Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 207–244.
28. Robinson B., Bolan N., Mahimairaja S., Clothier B. Solubility, Mobility, and Bioaccumulation of Trace Elements: Abiotic Processes in the Rhizosphere. *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation*. Eds. M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan. New York, USA, Taylor & Francis Group, 2006. pp. 97–110.
29. Kaplan D.I., Buettner S.W., Li Dien, Huang Shan, Koster van Groos P.G., Jaffe P.R., Seaman J.C. In situ porewater uranium concentrations in a contaminated wetland: Effect of seasons and sediment depth. *Applied Geochemistry*, 2017, vol. 85, pp. 128–136. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.11.017> 0883–292 (accessed 31 October 2017).
30. Arbuzov S.I., Maslov S.G., Finkelman R.B., Mezhibor A.M., Ilenok S.S., Blokhin M.G., Peregudina E.V. Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, no. 10, pp. 1–22. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012> (accessed 12 October 2017).

Received: 29 May 2018.

#### Information about the authors

**Tatyana M. Potapova**, Cand. Sc., senior lecturer, St.-Petersburg State University.

**Mikhail L. Markov**, Cand. Sc., head of a department, State Hydrological Institute.

**Andrey P. Nosal**, Dr. Sc., head of the department, Russian Scientific Research Institute of Water Management.

**Oleg G. Savichev**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.692.23

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СТРУЙНОГО РАЗМЫВА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В НЕФТЯНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ

**Бутов Владимир Григорьевич<sup>1</sup>,**  
bvg@niipmm.tsu.ru

**Никulichиков Андрей Викторович<sup>1</sup>,**  
nikulchikov@sibmail.com

**Никulichиков Виктор Кенсоринович<sup>1</sup>,**  
nikulchikov@tpu.ru

**Солоненко Виктор Александрович<sup>2</sup>,**  
vik@niipmm.tsu.ru

**Ящук Алексей Александрович<sup>2</sup>,**  
rainbow@niipmm.tsu.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.** При эксплуатации нефтяных резервуаров часто возникает проблема отложения твердых частиц и тяжелых парафинистых осадков на днище резервуара. Выпадение данных осадков влечет за собой уменьшение полезного объема резервуара, препятствует свободному перемешиванию слоев нефти, что в свою очередь способствует концентрации агрессивных растворов солей в районе днища и развитию коррозионных разрушений нефтяных резервуаров. Для предотвращения подобных ситуаций предусмотрен комплекс мер (например, ручная и механизированная очистка резервуаров с использованием горячей воды и химических реагентов), однако существенный интерес представляют устройства, препятствующие выпадению донных осадков без остановки эксплуатации резервуара, например винтовые устройства, размывающие донные отложения с помощью турбулентной струи.

**Цель исследования:** расчет гидродинамических характеристик турбулентной затопленной струи в резервуаре при различных температурах нефти; определение реологических параметров нефти, при которых возможно размывание донных отложений в резервуаре.

**Объекты исследования:** конструкция винтового устройства размыва донных отложений в резервуарах с нефтью, влияние основных режимных и конструктивных характеристик винта устройства на параметры турбулентной струи, моделирование процесса гидродинамического течения нефти в замкнутом объеме резервуара.

**Методы:** метод конечных объемов с использованием ANSYS CFX.

В результате расчетов конструкций показаны зависимость скорости размыва от расстояния до винта для разных значений температур и соответствующей им вязкости нефти, показаны условия, при которых возможен размыв донных отложений в резервуаре для данной геометрии гребного винта.

### **Ключевые слова:**

Нефть, реологическая модель, метод конечных объемов, касательные напряжения, продольная скорость, скорость размыва.

### **Введение**

При эксплуатации нефтяных резервуаров часто возникает проблема отложения твердых частиц и тяжелых парафинистых осадков на днище резервуара [1]. Выпадение данных осадков влечет за собой уменьшение полезного объема резервуара, препятствует свободному перемешиванию слоев нефти, что в свою очередь способствует концентрации агрессивных растворов солей в районе днища и развитию коррозионных разрушений нефтяных резервуаров [2–4]. Для предотвращения подобных ситуаций предусмотрен комплекс мер (например, ручная и механизированная очистка резервуаров с использованием горячей воды и химических реагентов [5–10]), однако существенный интерес

представляют устройства, препятствующие выпадению донных осадков без остановки эксплуатации резервуара, например винтовые устройства, размывающие донные отложения с помощью турбулентной струи [11–13].

При работе устройства размыва при вращении лопастей гребного винта создается направленная затопленная турбулентная струя жидкости. Под воздействием затопленной турбулентной струи от лопастей винта нефть в резервуаре перемешивается, имеющиеся донные отложения размываются. Устройство для размыва донных отложений для интенсификации процесса перемешивания выполнено с возможностью поворота вала винта на угол 60°. При работе устройства в крайних точках в ре-

резервуаре возникает круговое движение всей массы нефти в резервуаре.

Цель работы:

- 1) расчет гидродинамических характеристик турбулентной затопленной струи в резервуаре при различных температурах нефти;
- 2) определение реологических параметров нефти, при которых возможно размывание донных отложений в резервуаре.

#### Методы

При проведении расчетов трехмерной задачи применялся метод конечных объемов с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Уравнения модели течения (1)–(5), реализованные в комплексе ANSYS CFX, представлены в руководствах по гидродинамике, например, в [14–17].

В рамках этого комплекса были построены конечно-объемные модели [18, 19], воспроизводящие геометрию рассматриваемых расчетных областей и позволяющие проводить комплексные расчеты с учетом пространственного турбулентного характера течения.

Для моделирования была использована конечно-объемная расчетная сетка с 1134867 элементами и 510450 узлами для расчета течения в резервуаре. Для моделирования течения в окрестности винта была использована сетка с числом элементов и узлов 394627 и 168245 соответственно.

Для описания турбулентного течения были применены эйлеровы переменные  $x_i, i=1,2,3$ . Течение в данной точке пространства во времени характеризуется для жидкости вектором скорости  $\vec{U}$  с компонентами  $u_i, (i=1,2,3)$  и давлением  $p$ . Температура  $T$  и плотность жидкости  $\rho$  считаются постоянными величинами.

Уравнение неразрывности для осредненных по времени величин:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0. \quad (1)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial \tau_{ik}}{\partial x_k}, \quad (2)$$

где  $g_i$  – массовая сила в  $i$ -м направлении, в случае расчета  $g_1=g_2=0, g_3=\rho g, g$  – ускорение силы тяжести.

Тензор вязких напряжений без учета влияния градиентов давления имеет вид

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – коэффициент вязкости, зависящий от температуры;  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера.

Уравнение для энергии турбулентного перемешивания:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i \tau_{ij}) - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right). \quad (4)$$

Уравнение для удельной скорости диссипации:

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \omega) = \frac{\gamma \omega}{k} \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i \tau_{ij}) - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\mu + \sigma^* \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right). \quad (5)$$

Здесь  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $\omega$  – частота турбулентных пульсаций.

Характеристики нефти при различных температурах приняты согласно [20].

Нефть имеет ньютоновские свойства при температуре выше 20 °С включительно. Поскольку нефть имеет неньютоновские свойства при температуре ниже 20 °С, для ее описания при этих значениях использовалась модель вязкости Бингама–Шведова [20].

Геометрические и режимные параметры устройства задавались следующим образом:

- диаметр винта, мм – 690 (определялся размером люка резервуара);
  - количество лопастей винта, шт – 3;
  - частота вращения винта, об/мин – 460;
  - угол поворота вала винта, угл. град, не менее 60.
- Расчеты проведены в диапазоне температур нефти от +10 до +40 °С.

Вязкость нефти задавалась из диапазона 5–100 сСт.

В расчетах использовался нефтяной резервуар РВСП:

- объем, м<sup>3</sup> – 50000;
- диаметр, м – 60,7;
- высота стенки, м – 18,1.

#### Обсуждение полученных результатов

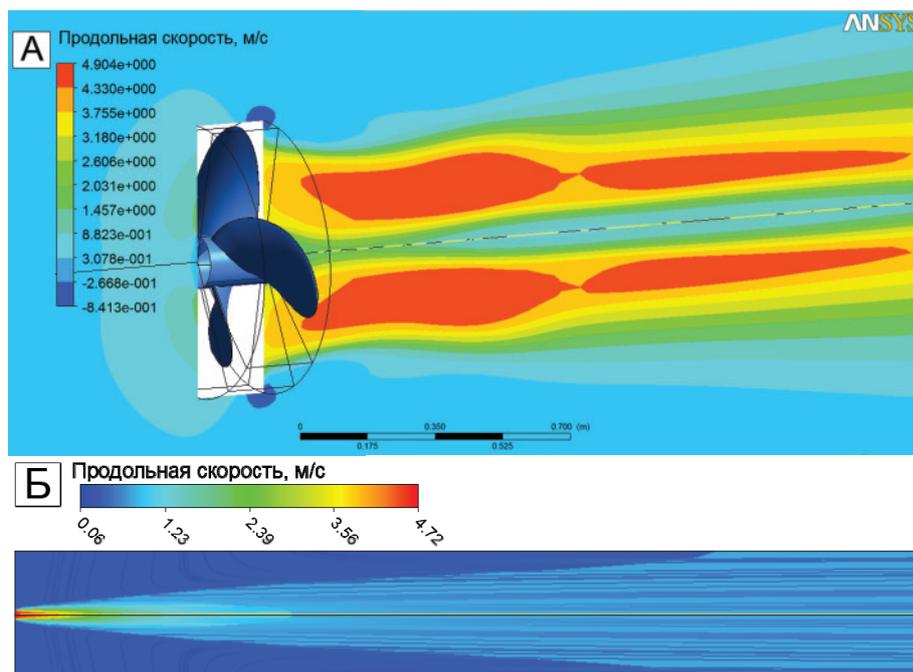
Моделирование поведения затопленной турбулентной струи, формируемой винтом

Результаты моделирования турбулентной струи, формируемой винтом, с использованием полной 3-D модели винта при высоких температурах нефти (выше 20 °С) представлены на рис. 1.

При частоте вращения винта 460 об/мин продольная скорость непосредственно за винтом составляет до 4,9 м/с (рис. 1, А).

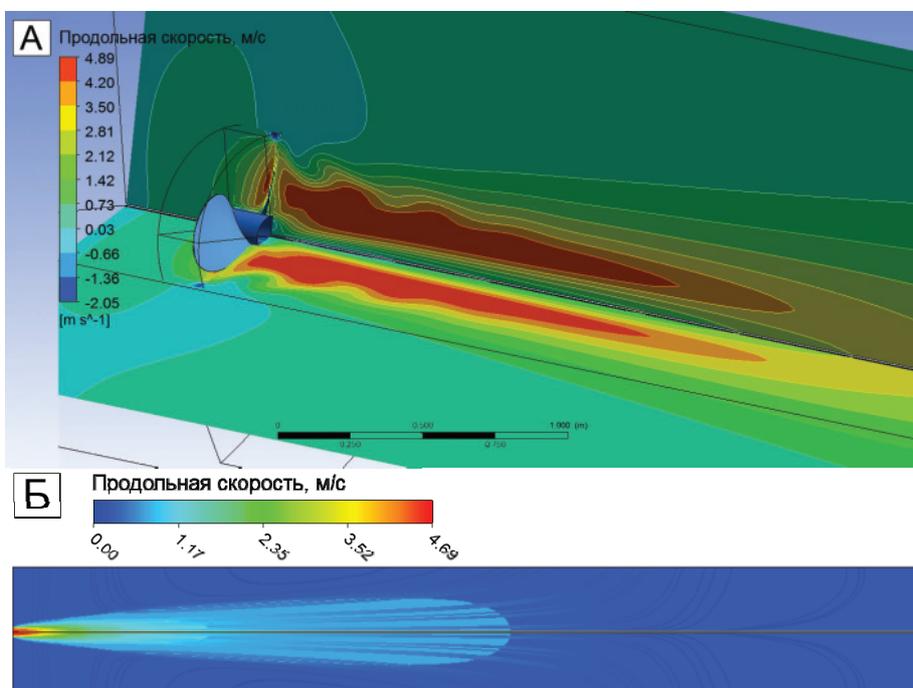
В случае низких температур (менее 15 °С) нефть проявляет неньютоновские свойства, результаты аналогичного расчета для этого случая представлены на рис. 2.

На рис. 3 приведена зависимость скорости размыва от расстояния до винта для разных значений



**Рис. 1.** Распределение продольной скорости при вращении винта с частотой 460 об/мин в нефти, подчиняющейся закону Ньютона в диапазоне температур свыше 20 °С: в локальной окрестности винта (А) и в неограниченном (справа) пространстве (Б)

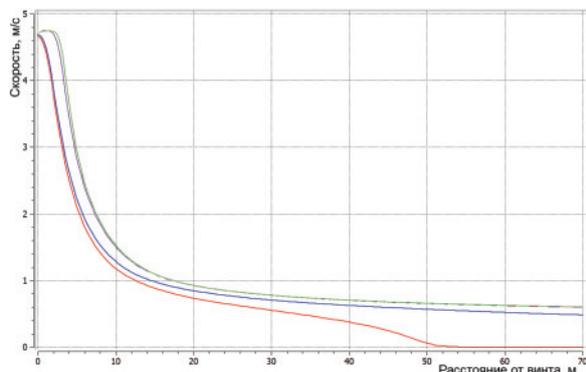
**Fig. 1.** Distribution of axial velocity in Newtonian oil within the temperature range higher than 20 °C at propeller rotation frequency 460 rpm: in propeller vicinity (A); in unrestricted (on the right) space (B)



**Рис. 2.** Распределение продольной скорости при вращении винта с частотой 460 об/мин в нефти, подчиняющейся неньютоновскому закону при температуре 10 °С: в локальной окрестности винта (А) и в неограниченном (справа) пространстве (Б)

**Fig. 2.** Distribution of axial velocity in oil that exhibits non-Newtonian characteristics at temperature 10 °C and propeller rotation frequency 460 rpm: in propeller vicinity (A); in unrestricted (on the right) space (B)

температур и соответствующих им вязкостей нефти. Из результатов видно, что в случае соответствия модели течения ньютоновскому приближению скорость размыва на расстоянии 60,7 м от винта в случае неограниченного объема нефти будет составлять 0,6 м/с при вязкости, большей 30 сСт.



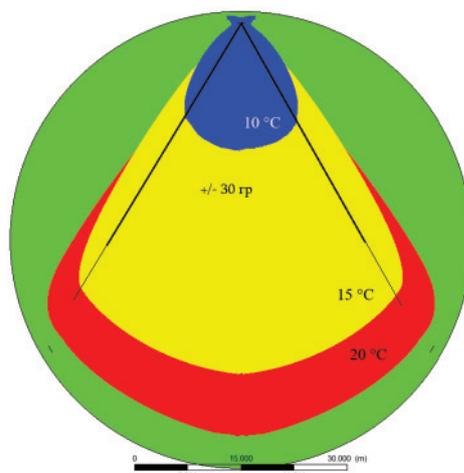
**Рис. 3.** Зависимость скорости размыва от расстояния до винта для разных значений температур и соответствующих им вязкостей: сиреневому цвету соответствует температура 20 °С или вязкость 30 сСт (ньютоновская модель); зеленому цвету соответствует температура 40 °С или вязкость 9 сСт (ньютоновская модель); синему цвету соответствует температура 15 °С или вязкость 50 сСт (неньютоновская модель); красному цвету соответствует температура 10 °С или вязкость 100 сСт (неньютоновская модель)

**Fig. 3.** Dependence of resuspension velocity on the distance from the propeller at various temperatures and corresponding oil viscosities: magenta color indicates temperature 20 °C or viscosity 30 cSt (Newtonian model); green color indicates temperature 40 °C or viscosity 9 cSt (Newtonian model); blue color indicates temperature 15 °C or viscosity 50 cSt (non-Newtonian model); red color indicates temperature 10 °C or viscosity 100 cSt (non-Newtonian model)

#### Моделирование течения в резервуаре

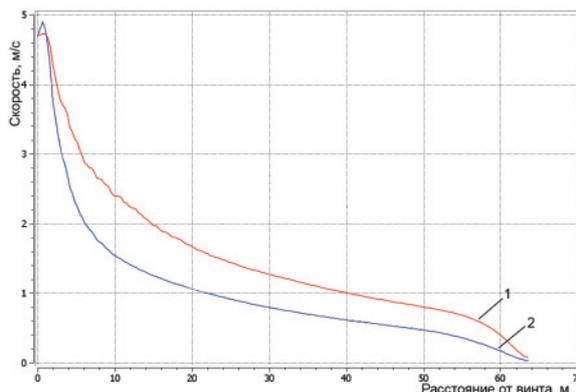
При моделировании течения внутри ограниченного объема при наличии одного устройства размыва донных отложений при варьировании поворота этого устройства в пределах  $\pm 30^\circ$  от направления на центр резервуара область, где скорость струи позволит осуществить размыв, будет представлена следующими рисунками.

На рис. 4 различными цветами представлены результаты определения области размыва при различных температурах и соответствующих им вязкостях. Графически скорость размыва в зависимости от расстояния до винта для различных температур и соответствующих им вязкостей показана на рис. 5. На рис. 6 представлены линии тока в объеме резервуара и профили скорости вдоль оси винта при нулевом отклонении оси винта для случая разных реологических моделей жидкости.



**Рис. 4.** Область размыва в зависимости от температуры (при 20, 15 и 10 °С)

**Fig. 4.** Resuspension zone for various temperatures (20, 15 and 10 °C)



**Рис. 5.** Зависимость скорости размыва от расстояния до винта: 1 – при вязкости 30 сСт в резервуаре (в рамках ньютоновской реологической модели); 2 – при вязкости 50 сСт в резервуаре (в рамках неньютоновской реологической модели)

**Fig. 5.** Dependence of resuspension velocity on the distance from the propeller: 1 – at viscosity 30 cSt in tank (within Newtonian rheological model); 2 – at viscosity 50 cSt in tank (within non-Newtonian rheological model)

#### Выводы

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

- 1) при заданных параметрах гребного винта при температурах нефти свыше 20 °С и указанного диапазона вязкости нефти возможно формирование потока жидкости со скоростью 0,5 м/с на расстоянии 60,7 м от лопастей винта в случае неограниченного объема нефти;
- 2) при температуре нефти ниже 15 °С для достижения требуемых параметров в случае неограни-

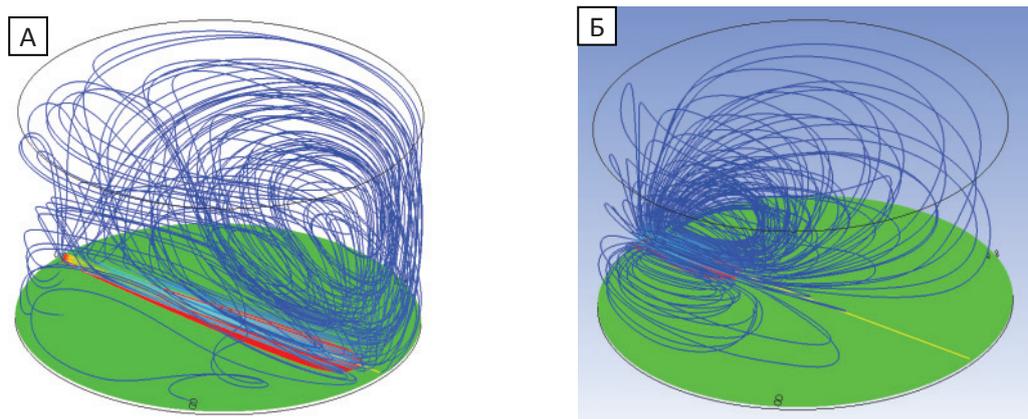


Рис. 6. Линии тока для вязкости 30 сСт в рамках ньютоновской реологической модели (А) и 100 сСт в рамках неньютоновской реологической модели (Б)

Fig. 6. Lines of flow with viscosity 30 cSt within Newtonian rheological model (A) and 100 cSt within non-Newtonian rheological model (B)

ченного объема нефти размыва достичь не удается (скорость 0,5 м/с на расстоянии 60,7 м от лопастей винта);

- 3) при размыве донных отложений в ограниченном объеме (резервуаре) для устранения застойных зон, находящихся вблизи стенок резервуара, в обязательном порядке необходимо применение нескольких устройств, устано-

вленных симметрично по периметру первого яруса резервуара. Количество устройств размыва донных отложений зависит от объема резервуара, свойств нефти и может быть определено расчетом.

Исследования проводились в рамках выполнения государственного задания Министерства образования и науки России, проект № 9.9752.2017/8.9.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Characterization of the sludge deposits in crude oil storage tanks / I.A. Gopang, N. Mahar, A.S. Jatoi, K.S. Akhtar, M. Omer, M.S. Azeem // Journal of Faculty of Engineering & Technology. – 2016. – V. 23 (1). – P. 57–64.
2. Рыбалко П.Н., Прибытков П.А., Бурков П.В. Исследование напряженно-деформированного состояния дна резервуара с коррозионным поражением // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых – Томск: ТПУ, 2014. – Т. II. – С. 624–625.
3. Гималетдинов Г.М., Саттарова Д.М. Способы очистки и предотвращения накопления донных отложений в резервуарах // Нефтегазовое дело. – 2006. – Т. 1. URL: <http://ogbus.ru/article/sposoby-ochistki-i-predotvrashheniya-nakopleniya-donnykh-otlozhenij-v-rezervuarax> (дата обращения 13.06.2018).
4. Experimental investigations of various methods of sludge measurements in storage oil tanks / M. Monteiro, V. Svet, D. Sandilands, S. Tsysar // Advances in Remote Sensing. – 2015. – V. 4. – № 2. – P. 119–137.
5. Чурикова Л.А., Конашева Е.А., Утегалиев А.Т. Обзор современных методов очистки резервуаров от нефтяных остатков // Технические науки в России и за рубежом: материалы V Международ. науч. конф. – М., январь 2016 г. – М.: Буки-Веди, 2016. – С. 71–75.
6. Hu G., Li J. Zeng G. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: a review // Journal of hazardous materials. – 2013. – V. 261. – P. 470–490.
7. Method for removing sludge in crude oil tank and recovering oil therefrom: patent US6673231B2, United States, Publ. 06.01.2004.
8. Method for cleaning storage tanks: patent US20070283981A1, United States, Publ. 13.12.2007.
9. Oil tank sludge removal method: patent US20060042661A1, United States, Publ. 2.03.2006.
10. Water washing method and system for crude oil tank: patent US20170291200A1, United States, Publ. 12.10.2017.
11. Костин М.В., Демин А.В., Садчиков А.В. Очистка емкостей от остатков нефти и нефтепродуктов с помощью эффлюэнта // Научное обозрение. Биологические науки. – 2015. – № 1. – С. 93.
12. Чепур П.В., Тарасенко А.А. Особенности совместной работы резервуара и устройств размыва донных отложений винтового типа // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2. – С. 1671–1675.
13. Nekrasov V.O. Modeling bottom sediment erosion process by swirling the flow by tangential supply of oil in the tank // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Transport and Storage of Hydrocarbons. – 2016. – V. 154. 7 p. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/154/1/012003> (дата обращения 13.06.2018).
14. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х т. Т. 1. – М.: Мир, 1991. – 504 с.
15. Андерсон Д., Таннехил Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. – М.: Мир, 1990. – 726 с.
16. Уилкоккс Д.К. Многомасштабная модель турбулентных течений // Аэрокосмическая техника. – 1989. – № 11. – С. 47–60.
17. Численное решение многомерных задач газовой динамики / под ред. С.К. Годунова. – М.: Наука, 1976. – 400 с.
18. Применение системы ANSYS к решению задач механики сплошной среды. Практическое руководство / под ред. проф. А.К. Любимова. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2006. – 227 с.

19. Burkov P.V., Burkova S.P., Samigullin V.D. Computer Simulation of Stress-Strain State of Oil Gathering Pipeline Designed for Ugut Field // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 125: Materials Treatment: Current Problems and Solutions. – 7 p.
20. Трубопроводный транспорт нефти и газа / Р.А. Алиев, В.Д. Белоусов, А.Г. Немудров, В.Л. Юфин, Г.И. Яковлев. – М.: Недра, 1988. – 368 с.

*Поступила 15.06.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Бутов В.Г.**, доктор физико-математических наук, профессор отделения ядерного топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Никульчиков А.В.**, кандидат физико-математических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Никульчиков В.К.**, кандидат технических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Солоненко В.А.**, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией оптимизации отдела математической физики Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета.

**Ящук А.А.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории оптимизации отдела математической физики Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета.

UDC 622.692.23

## SIMULATION STUDY OF BOTTOM SEDIMENTS JET EROSION IN OIL TANK

**Vladimir G. Butov,**  
bvg@niipmm.tsu.ru

**Andrey V. Nikulchikov<sup>1</sup>,**  
nikulchikov@sibmail.com

**Viktor K. Nikulchikov<sup>1</sup>,**  
nikulchikov@tpu.ru

**Victor A. Solonenko<sup>2</sup>,**  
vik@niipmm.tsu.ru

**Alexey A. Yashchuk<sup>2</sup>,**  
rainbow@niipmm.tsu.ru

<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.

**The relevance.** When crude oil is stored in tanks, invariably solid particles and heavy paraffin sediments are deposited. The precipitation of these sediments entails a decrease in reservoir useful volume, prevents free mixing of oil layers, which boosts the concentration of aggressive salt solutions in the bottom region and the development of corrosive destruction of oil reservoirs. A set of measures is envisaged to prevent such situations (including manual and mechanized cleaning of tanks using hot water and chemical reagents), however, the devices that prevent precipitation of bottom sediments without stopping the operation of the reservoir are of significant interest, for example, screw devices that dilute bottom sediments with the help of turbulent jet.

**The aim** of the research is calculation of hydrodynamic properties of turbulent submerged jet at various oil temperatures; definition of oil rheological parameters which enable the lift off, mix, and re-suspension of sediments in a tank.

**Objects of research:** design of the bottom sediment erosion device for oil tanks; influence of the screw regime and design parameters on the turbulent jet properties; simulation of oil hydrodynamic flow in a closed reservoir volume.

**Methods:** finite volume method in ANSYS CFX.

**Results.** The paper demonstrates the dependence of sediment resuspension velocity on the distance from the screw at various temperatures and corresponding oil viscosities. The conditions to re-suspend oil tank bottom sediments were defined for the given propeller geometry. It was proved that the screw-type device is an effective means to lift solids off the storage tank floor and ensure required characteristics of tank oil.

**Key words:**

Oil, rheological model, finite volume method, shear stress, longitudinal velocity, resuspension velocity.

The research was carried out within the State Task of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation, project no. 9.9752.2017/8.9.

**REFERENCES**

- Gopang I.A., Mahar H., Jatoi A.S., Akhtar K.S., Omer M., Az-eem M.S. Characterization of the sludge deposits in crude oil storage tanks. *Journal of Faculty of Engineering & Technology*, 2016, vol. 23 (1), pp. 57–64.
- Rybalko P.N., Pribytkov P.A., Burkov P.V. *Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya dnishcha rezervuara* [Study of stress-strain behavior of the corroded oil tank bottom surface]. Tomsk, TPU Publ., 2014, vol. 2, pp. 624–625.
- Gimaletdinov G.M., Sattarova D.M. *Sposoby ochistki i predotvrasheniya nakopleniya donnykh otlozheniy v rezervuarakh* [Methods of cleaning and preventing accumulation of bottom sediments in oil tanks]. *Neftegazovoe delo*, 2006, vol. 1. Available at: <http://ogbus.ru/article/sposoby-ochistki-i-predotvrasheniya-nakopleniya-donnykh-otlozheniy-v-rezervuarax> (accessed 13 June 2018).
- Monteiro M., Svet V., Sandilands D., Tsysar S. Experimental investigations of various methods of sludge measurements in storage oil tanks. *Advances in Remote Sensing*, 2015, vol. 4, no. 2, pp. 119–137.
- Churikova L.A., Konasheva E.A., Utegaliev A.T. Obzor sovremennykh metodov ochistki rezervuarov ot neftyanykh ostatkov [Modern methods of cleaning oil tanks: a review]. *Tekhnicheskije nauki v Rossii i za rubezhom. Materialy V Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Technical sciences in Russia and abroad: Proc. of International scientific conference]. Moscow, January 2016. Moscow, Buki-vedi Publ., 2016, pp. 71–75.
- Hu G., Li J., Zeng G. Recent development in treatment of oily sludge from petroleum industry: a review. *Journal of hazardous materials*, 2013, vol. 261, pp. 470–490.
- Kim M.-J., Yoon D.-S., Choi C.-H., Choi J.-T., Kwak J.-W., Park S.-K. *Method for removing sludge in crude oil tank and recovering oil therefrom*. Patent United States, US6673231B2, 2004.

8. Stewart T.E. *Method for cleaning storage tanks*. Patent United States, US20070283981A1, 2007.
9. Meyer D., Brons G., Perry R., Wildemeersch S., Kennedy R. Oil tank sludge removal method. Patent United States, US20060042661A1, 2006.
10. Son S.G. *Water washing method and system for crude oil tank*. Patent United States, US20170291200A1, 2017.
11. Kostin M.V., Demin A.V., Sadehikov A.V. Tank cleaning residues from oil and oil products through the effluent. *Scientific review. Biological sciences*, 2015, vol. 1, p. 93. In Rus.
12. Chepur P.V., Tarasenko A.A. The features of washout sediments devices screw type and tank collaboration. *Fundamental research*, 2015, vol. 2, pp. 1671–1675. In Rus.
13. Nekrasov V.O. Modeling bottom sediment erosion process by swirling the flow by tangential supply of oil in the tank. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: Transport and Storage of Hydrocarbons*, 2016, vol. 154, 7 p. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/154/1/012003> (accessed 13 June 2018).
14. Fletcher C.A.J. *Computational Techniques for Fluid Dynamics*. Berlin, Springer-Verlag, 1988. 409 p.
15. Anderson D.A., Tannehill J.C., Pletcher R.H.I. New York, McGraw-Hill, 1984, 609 p.
16. Wilcox D.C. Multiscale Model for Turbulent Flows. *AIAA Journal*, 1988, vol. 26, no. 11, pp. 1311–1320.
17. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki* [Numerical solution of multidimensional problems in gas dynamics] Ed. by S.K. Godunov. Moscow, Nauka Publ., 1976, 400 p.
18. *Primenenie sistemy ANSYS k resheniyu zadach mekhaniki sploshnoy sredy. Prakticheskoe rukovodstvo* [Use of ANSYS software in solving problems of continuum mechanics]. Ed. by A.K. Lyubimov. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University Press, 2006, 227 p.
19. Burkov P.V., Burkova S. P., Samigullin V. D. Computer Simulation of Stress-Strain State of Oil Gathering Pipeline Designed for Ugut Field. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 125: Materials Treatment: Current Problems and Solutions, 7 p.
20. Aliev R.A., Belousov V.D., Nemudrov A.G., *Truboprovodny transport nefti i gaza* [Oil and gas pipeline transport]. Moscow, Nedra Publ., 1988, 368 p.

Received: 15 June 2018.

#### Information about the authors

**Vladimir G. Butov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Andrey V. Nikulchikov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Viktor K. Nikulchikov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Victor A. Solonenko**, Cand. Sc., head of laboratory, Tomsk State University.

**Alexey A. Yashchuk**, Cand. Sc., senior research assistant, Tomsk State University.

УДК 550.46

## ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КИСЛОТНЫХ ВЫТЯЖЕК ПО ГЛУБИНЕ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ ВНУТРИБОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ ВАСЮГАНСКОГО БОЛОТА (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Савичев Олег Геннадьевич<sup>1</sup>,  
OSavichev@mail.ru

Мазуров Алексей Карпович<sup>1</sup>,  
AKM@tpu.ru

Рудмин Максим Андреевич<sup>1</sup>,  
RudminMA@tpu.ru

Хвощевская Альбина Анатольевна<sup>1</sup>,  
Garibova@yandex.ru

Даулетова Айгерим Бауыржановна<sup>1</sup>,  
lkerimdb@gmail.com

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность работы.** Анализ изменений химического и минерального состава органогенных и минеральных грунтов является важным этапом поисков полезных ископаемых, разработки соответствующей методологии, а также методологии экологического мониторинга.

**Цель работы:** выявление закономерностей изменения химического состава кислотных вытяжек по глубине торфяной залежи на примере восточного участка Васюганского болота.

**Методы исследования:** ландшафтно-геохимический и статистические методы, методы определения химического и минерального состава, имитационное математическое моделирование.

**Результаты и выводы.** По данным опробования торфов и минерального грунта в марте 2017 и 2018 гг. в восточной части Васюганского болота (Западная Сибирь, Российская Федерация) выполнен анализ: химического состава кислотных вытяжек из торфов, органо-минеральных отложений и минерального грунта с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой; состава минеральных включений в торфа и минерального состава подстилающего грунта методом сканирующей электронной микроскопии и рентгенодифракционного анализа. По результатам исследования определены концентрации 73 химических элементов, среди которых выделены три группы: 1) с относительно устойчивым увеличением от поверхности к минеральным грунтам и/или ярко выраженным максимумом в минеральных грунтах; 2) с хорошо выраженными максимумами в верхней и нижней частях разреза; 3) с иными типами распределения. Основными факторами пространственных изменений химического состава грунтов являются преимущественно природные биогеохимические условия, интенсивность водообмена, соотношение атмосферного и грунтового водного и минерального питания, определяющие общую доступность воды и питательных веществ для болотной растительности, отвод токсичных для этой растительности веществ.

### Ключевые слова:

Васюганское болото, торф, минеральный грунт, химический состав, минеральный состав, изменение по глубине.

### Введение

Изучение процессов и условий формирования геохимических аномалий в компонентах окружающей среды является важным этапом решения целого ряда разнообразных научных и инженерных задач – от поисков полезных ископаемых до размещения и утилизации бытовых и промышленных отходов. В том числе значительный интерес представляет исследование аккумуляции и выноса химических элементов в торфяных болотах с точки зрения формирования слоев с повышенными концентрациями как непосредственно в них, так и в угольных пластах, сформировавшихся ранее в подобных условиях. С учетом этого в течение нескольких десятилетий в Томском политехническом университете (ТПУ) проводятся комплексные исследования Васюганского болота – одного из крупнейших в мире [1–7]. Его площадь превышает

50 тыс. км<sup>2</sup>, причем оно продолжает увеличиваться со скоростью вертикального прироста торфа около 1 мм/год [8–10].

В результате ранее проведенных исследований было выполнено обобщение и анализ данных о химическом составе болотных вод в таёжной зоне Западной Сибири, анализ его временных изменений в восточной части Васюганского болота, разработана модель распространения неорганических веществ в загрязнённых водах олиготрофного болота на примере участка Васюганского болота и проведены геомиграционные расчёты, в результате которых показано следующее.

1. Наблюдается общее уменьшение содержаний растворённых солей с юга – юго-запада на север – северо-восток по мере увеличения модулей водного стока и доли верховых болот в заболоченности водосборов, на фоне которого отмечается увеличение

- концентраций большинства изученных веществ: 1.1) от водоразделов к долинам; 1.2) на участках с преобладающей лесо-топяной торфяной залежью по сравнению с лесной и топяной [11].
2. В течение 2003–2017 гг. статистически значимые однонаправленные изменения химического состава болотных вод в деятельном горизонте торфяной залежи отсутствуют, а наблюдаемые колебания гидрохимических показателей обусловлены изменчивостью атмосферного увлажнения, которое в годовом разрезе периода 1965–2016 гг. остаётся статистически постоянным, причем: 2.1) гидрохимический режим мезотрофной окраины олиготрофного болота отличается наибольшей изменчивостью минерализации болотных вод и зависимостью от величины атмосферного увлажнения, а гидрохимический режим «ряма» (сосново-кустарничково-сфагнового болота) – наименьшим влиянием атмосферного увлажнения; 2.2) общими чертами гидрохимического режима изученных трёх экосистем восточной части Васюганского болота – мезотрофной окраины, «ряма», грядово-мочажинного комплекса – является определённое уменьшение минерализации в период весеннего половодья и увеличение соединений N, P, Si и микроэлементов в зимнюю межень [6].
  3. Наиболее значительные изменения минерализации болотных вод в результате поступления производственных сточных вод приурочены к верхнему слою толщиной около 0,5–1,0 м на расстоянии до 200 м от выпуска; создание в деятельном горизонте изоляционного слоя из суглинка помогает снизить воздействие на болотные воды, но не обеспечивает сохранение их фонового состояния в инертном горизонте [12, 13].
  4. Формирование выпуклого рельефа олиготрофных болотных экосистем возможно в результате приспособления системы «сосна – кустарники – сфагновые мхи» к гидрологическим и гидрогеохимическим условиям и взаимного влияния биотических и абиотических компонентов, когда сосна формирует «фундамент» экосистемы, кустарники – «армирующий слой», а сфагновые мхи выступают в двойственной роли «наполнителя» экосистемы и «стимулятора» вертикального прироста поверхности; при этом олиготрофная болотная экосистема остаётся неравновесной и непрерывно изменяется в зависимости от гидрогеохимических условий, которые регулируют количество доступных биогенных элементов, кислородный режим торфяной залежи, выведение и трансформацию токсичных продуктов биогеохимических и биохимических процессов [14].
  5. В торфяных болотах происходит достаточно резкое уменьшение фильтрационных свойств торфов на границе деятельного и инертного горизонтов и, возможно, у дна торфяной залежи на границе торф – органоминеральные отложения, что способствует снижению интенсивно-

сти массообмена между болотной экосистемой и окружающей средой; соответственно увеличивается время взаимодействия воды с торфом и минеральными примесями и затрудняется доступ кислорода. В свою очередь, это способствует формированию окислительного и восстановительного геохимических барьеров и накоплению ряда металлов примерно на глубинах 0,3–0,7 м, в ряде случаев – ниже 0,7 м. Ещё одной ключевой особенностью процессов аккумуляции веществ в болотных экосистемах является чрезвычайно важная роль органического вещества, способствующего формированию геохимических аномалий даже при отсутствии расположенных вблизи крупных эндогенных и экзогенных источников вещества [14, 15].

Последний вывод был обоснован в основном по данным изучения болотных вод, кислотных и водных вытяжек из торфов в верхней части торфяной залежи, что и обусловило цель рассматриваемой работы – выявление закономерностей изменения химического состава кислотных вытяжек по всей глубине торфяной залежи с подтверждением выводов по геохимии торфов данными о составе минеральных включений в торфах и минеральных грунтов основания торфяного болота (на примере восточного участка Васюганского болота). Целесообразность использования минералогических данных обусловлена тем, что, с одной стороны, повышенные концентрации металлов на фоне разнонаправленных биогеохимических процессов в разрезе торфяного болота способствуют накоплению и/или формированию минеральных форм [16–19]. С другой стороны, в настоящее время остается открытым целый ряд вопросов относительно природы (привнесенные или новообразованные) и источника (антропогенный или литогенный) минералов в торфяной залежи [7, 16, 17, 20–27].

#### Объекты и методика исследования

Объектом исследования является восточный участок Васюганского болота на водоразделе рек Бакчар и Икса (93 км по трассе Томск–Бакчар), расположенный в пределах верхней части водосбора реки Ключ (элемент речной сети «Ключ – Бакчар – Чая – Обь – Карское море»). Участок представляет собой сопряжение мезотрофной окраины в виде мезотрофного сосново-кустарничкового болота с участием сфагновых мхов и осоки, олиготрофного сосново-кустарничково-сфагнового болота (олиготрофный «рям», далее – рям) и грядово-мочажинного комплекса (ГМК). Наиболее интенсивное формирование болотной экосистемы происходило примерно в последние 3–5 тыс. лет [9, 28, 29]. По данным [30], максимальная глубина торфа составляет 5,3 м, средняя глубина – 1,95 м; торфа – верховые, переходные, низинные, смешанные; средние значения степени разложения торфа 22 %, зольности 6 %, влажности 90,1 %. Более подробное описание участка и прилегающей территории приведено в [6, 29, 31, 32].

Исследование включало:

1) отбор в конце зимней межени 2017 и 2018 гг. (при наличии устойчивого снежного покрова) проб торфа, органо-минеральных отложений (ОМО – отложений, в которых органическое вещество составляет от 15 до 50 % сухой массы [33]) и минерального грунта из интервалов 0,25 м по глубине торфяной залежи с уменьшением интервалов до 0,10–0,15 м при опробовании минерального грунта и ОМО;

2) определение химического состава проб кислотных вытяжек из торфа, ОМО и минерального грунта, а также pH и удельной электропроводности (ЕС) водных вытяжек в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории ТПУ; пробы торфа предварительно высушивались до воздушно-сухого состояния и растирались в фарфоровой ступке; для анализа водных вытяжек навеска пробы (50–100 г) помещалась в круглодонную колбу с добавлением деионизованной воды (соотношение торфа и воды 1:10), перемешивалась в течение 3 мин, затем проводилось центрифугирование в течение 5 мин; для анализа кислотных вытяжек навеска пробы (0,2–0,5 г) помещалась в полиэтиленовую пробирку с добавлением 3 мл азотной кислоты, очищенной с помощью системы Distillasid BSB-939-IR (Berghof, Германия), а затем в микроволновую печь и прогревалась на минимальной мощности (100–300 W) в течение 10 мин. без закипания раствора, затем объем полученного раствора доводился деионизованной водой до 50 мл; методы определения в водной вытяжке: pH – потенциометрический; удельная электропроводность ЕС – кондуктометрический; в кислотной вытяжке – 73 химических элементов, включая Ca, Mg, Na, K, S, Si, Al, Fe, P, La, Ce, U и другие – масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой (масс-спектрометр NexION 300D);

3) расчет коэффициентов влагопроводности  $k_w$  торфов, ОМО и минерального грунта для оценки влияния интенсивности водообмена на минералого-геохимические условия:

3.1) для торфов согласно [12, 34, 35]:

$$k_w = k_f \left( \frac{w - w_0}{w_1 - w_0} \right)^{k_1}, \quad (1)$$

$$k_f = \frac{k_2 k_a}{(Z + k_3)^{k_4}}, \quad (2)$$

где  $k_w$  – коэффициент влагопереноса;  $k_f$  – коэффициент фильтрации;  $Z$  – глубина точки, в которой определяется значение  $k_f$  (от средней поверхности болота);  $k_a$  – коэффициент, учитывающий анизотропные свойства торфов;  $w$  – объемная влажность торфа на глубине  $Z$ ;  $w_0$  – содержание связанной влаги;  $w_1$  – влажность при полном насыщении;  $k_1, k_2, k_3, k_4$  – эмпирические коэффициенты; значение коэффициента  $k_1$  (3,5) принято по данным С.Ф. Аверьянова (приводится по [35]), значения  $k_2$  (82,659),  $k_3$  (1),  $k_4$  (3,244) определены по материалам [36],  $k_a$  (0,626) – по данным о фильтрационных

свойствах торфов Томской области [37, 38]; объемная влажность  $w$  (в долях единицы) определена по данным выполненных исследований, значения  $w_0$  (0,53) и  $w_1$  (0,96) приняты по данным [39, 40] с учетом данных об изменениях  $w$  в торфах рассматриваемого участка;

3.2) для ОМО и минерального грунта по Р. Клэппу и Г. Хорнбергу (приводится по [41]):

$$k_w = k_{f,0} \left( \frac{w}{w_s} \right)^{2B+3}, \quad (3)$$

$$w_s = (494,305 - 1,080 C_{sand}) / 1000, \quad (4)$$

$$B = 0,137 C_{clay} + 3,501, \quad (5)$$

где  $k_{f,0}$  – коэффициент фильтрации в минеральном грунте;  $w_s$  – пористость;  $C_{sand}$  и  $C_{clay}$  – содержание в пробе песка и глины соответственно; значения  $C_{sand}$  и  $C_{clay}$  оценены по данным рассматриваемого исследования, а значения  $k_{f,0}$  приняты по данным, приведенным в [41], с учетом  $C_{sand}$  и  $C_{clay}$ ;

4) изучение минеральных включений в торфе и минерального состава подстилающего грунта в ТПУ методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием микроскопа TESCAN Vega 3 SBU, оснащенного приставкой для рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) OXFORD X-Max 50, и рентгенодифракционного анализа (РДА) на дифрактометре Rigaku Ultima IV; для определения минеральных включений использовался как сухой остаток торфа, так и его зола, полученная при определении зольности (определение зольности торфа по разнице масс сухой пробы торфа, высушенной при 105 °С, и минеральной части торфа, полученной после прокаливания пробы при температуре 450 °С в течении 12 ч);

5) обобщение и статистический анализ данных (с помощью пакета MS Excel при уровне значимости 5 %); корреляционная связь принималась значимой при условии (6), а регрессионная зависимость – при условии, если коэффициенты регрессии по модулю двукратно превышают погрешность их определения, а квадрат корреляционного отношения [42]  $R^2 > 0,36$ .

$$|r| > 2 \frac{1 - r^2}{\sqrt{N - 1}}, \quad (6)$$

где  $r$  – коэффициент корреляции;  $N$  – объем выборки. Проверка на однородность по среднему проводилась с использованием критерия Стьюдента  $K_S$  (7), по дисперсии – с помощью критерия Фишера  $K_F$  (8) при уровне значимости 5 %:

$$K_S = \frac{|A_x - A_y|}{\sqrt{N_x D_x + N_y D_y}} \sqrt{\frac{N_x N_y (N_x + N_y - 2)}{N_x + N_y}}, \quad (7)$$

$$K_F = \frac{\max(D_x; D_y)}{\min(D_x; D_y)}, \quad (8)$$

где  $N_x, N_y, A_x, A_y, D_x, D_y$  – объёмы, средние арифметические и дисперсии сравниваемых выборок  $x$  и

у. Гипотеза об однородности сравниваемых выбо-  
рок не отвергается, если фактические значения  $K_S$   
и  $K_F$  меньше критических [43].

#### Результаты исследования и их обсуждение

Опробование проводилось по профилю, распо-  
ложенному примерно перпендикулярно суходолу,  
покрытому заболоченным смешанным лесом [6].  
Самые дальние (от суходола) точки расположены в  
пределах мочажины (широта  $56,939^\circ$ ; долгота  
 $82,698^\circ$ ) и гряды ( $56,937^\circ$ ;  $82,698^\circ$ ) грядово-моча-  
жинного комплекса (от 900 до 1900 м от границы  
болота и леса). Средняя глубина торфяной залежи  
исследованного участка ГМК – около 3 м. Непос-  
редственно в точках отбора проб 30.03.2018 г. ор-  
гано-минеральные отложения в 2018 г. встречены  
в пределах гряды ГМК на глубине 3,60–3,80 м, в  
мочажине – не выявлены. Минеральный грунт,  
представленный заторфованным суглинком, отме-  
чен в гряде на глубине 3,8 м, в мочажине –  
3,7 м. Среднее значения pH водной вытяжки из  
торфов по глубине торфяной залежи в мочажине  
составляет 4,42, в гряде – 4,85; средние значения  
удельной электропроводности ЕС в мочажине и  
гряде – 63,1 и 98,8 мкС/см, соответственно.

Рям на исследуемом участке Васюганского бо-  
лота расположен в 200–900 м от границы болота  
(средняя глубина торфяной залежи на участке ря-  
ма – 2,8 м). Отбор проб проводился: 23.03.2017 г.  
в точке с координатами ( $56,961^\circ$ ;  $82,515^\circ$ ) и глуби-  
ной торфяной залежи 2,50 м (ОМО – на глубине  
2,50–2,75 м); 30.03.2018 г. – в точке с координата-  
ми ( $56,928^\circ$ ;  $82,700^\circ$ ) и глубиной торфяной залежи  
3,75 м (ОМО 3,75–4,25 м). Минеральный грунт  
основания торфяной залежи представлен тяжелым  
суглинком. Средние значения pH водных вытяжек  
из торфа в 2017 г. составили 4,94, в 2018 г. – 5,01;  
средние значения ЕС – 66,2 и 57,1 мкС/см, соот-  
ветственно. Мезотрофная окраина представляет со-  
бой полосу вдоль заболоченного леса шириной до  
200 м и средней глубиной торфяной залежи около  
1 м. Опробование проводилось 30.03.2018 г. в точ-  
ке с глубиной торфяной залежи 1,6 м. ОМО встре-  
чены на глубинах 1,60–1,75 м. Минеральный грунт  
представлен тяжелым и средним суглинками. Сред-  
нее значение pH водных вытяжек из торфа – 5,46,  
удельной электропроводности – 40,7 мкС/см. Поч-  
венная проба (0,00–0,10 м от поверхности) взята в  
заболоченном лесу в точке с координатами  $56,919^\circ$   
и  $82,708^\circ$ . Значение pH водной вытяжки из почвы  
составило 7,2, удельная электропроводность –  
184,4 мкС/см (табл. 1).

Минеральный состав органо-минеральных от-  
ложений и минеральных грунтов основания торф-  
яного болота представлен в основном кварцем, по-  
левыми шпатами и глинистыми минералами. В со-  
ставе последних отмечено крайне неравномерное  
распределение смешаннослойных минералов  
(ССМ) и минералов группы смектита, максимумы  
которых обнаружены в верхнем слое минерально-  
го грунта мезотрофной окраины болота. В неболь-

шом количестве присутствуют амфиболы, магне-  
тит и карбонаты, причем кальцит не встречен в  
грунтах мезотрофной окраины болота, а в преде-  
лах ГМК его содержание в органо-минеральных  
отложениях превышает 10 %. Кроме того, в преде-  
лах ряма в 2017 г. в составе минеральных включе-  
ний в торфа практически по всей глубине торф-  
яной залежи и органо-минеральных отложениях  
отмечены гидроксиды железа и фосфаты редкозе-  
мельных элементов (РЗЭ), в торфе на глубинах  
0,00–0,50, 1,00–1,50 м и в минеральном грунте –  
барит, в инертном горизонте торфяной залежи и  
минеральном грунте – сульфиды Fe, Zn, Pb  
(табл. 2).

Анализ значений коэффициентов влагопровод-  
ности, рассчитанных по формулам (1)–(5), пока-  
зал, что для болотных экосистем характерно доста-  
точно резкое ухудшение водообмена примерно на  
глубинах  $Z$ , соответствующих 0,3–0,4 и 0,7–0,8 от  
глубины обнаружения минерального грунта  $Z_{soil}$   
(рис. 1). Диапазон 0,3–0,4  $Z/Z_{soil}$  может быть сопо-  
ставлен с границей деятельного и инертного гори-  
зонтов торфяной залежи [35, 36] и сменой окисли-  
тельной обстановки на восстановительную, а ди-  
апазон 0,7–0,8  $Z/Z_{soil}$  – с границей наиболее интен-  
сивных взаимодействий органического вещества  
торфов, болотных вод, растворенных газов и ми-  
нерального грунта основания торфяного болота  
[5, 44] при существенном возрастании pH водных  
вытяжек до 7,5 и более (рис. 2).

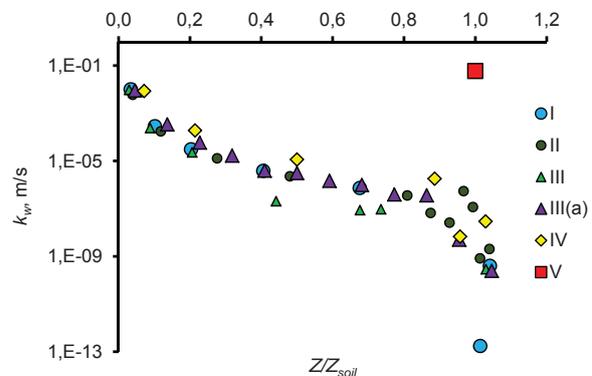


Рис. 1. Изменение значений коэффициентов влагопровод-  
ности  $k_w$  в зависимости от относительной глубины  
 $Z/Z_{soil}$  в различных экосистемах:  $Z$  – средняя глубина  
интервала опробования;  $Z_{soil}$  – верхняя граница зале-  
гания минерального грунта; экосистемы: I – мочажи-  
на ГМК в 2018 г.; II – гряда ГМК в 2018 г.; III и III(a) –  
ряма в 2018 и 2017 г., соответственно; IV – мезотроф-  
ное болото между заболоченным лесом и рямом; V –  
заболоченный смешанный лес

Fig. 1. Change of values of soil hydraulic conductivity factors  $k_w$   
depending on relative depth  $Z/Z_{soil}$  in various ecosystems:  
 $Z$  is the average depth of approbation interval;  $Z_{soil}$  is the  
top border of bottom (mineral) soils; ecosystems: I –  
hollow of the hollow-ridge complex in 2018; II – ridge of  
the hollow-ridge complex in 2018; III and III(a) –  
the oligotrophic pine-dwarf-shrub-sphagnum bog – in  
2018 and 2017 accordingly; IV – the mesotrophic border  
of an oligotrophic bog; V – the boggy mixed forest

**Таблица 1.** Химический состав кислотных вытяжек из торфов, органико-минеральных отложений, минерального грунта в восточной части Васюганского болота

**Table 1.** Chemical composition of acid extracts from peats, organic soil and bottom soil in the east part of the Vasyugan mire

Показатель Index	Средние значения (количество проб) Average values (amount of tests)			Минеральный грунт и почва 30.03.2018 г. в экосистемах Soils at 30.03.2018 in ecosystems:				
	торф peat (32)	ОМО organic soil (4)	грунт soil (7)	мочажина ГМК hollow of HRC	гряда ГМК ridge of HRC	Рям ryam	МО MSOB	лес (почва) forest (soil)
$k_w$ , м/с/м/с	$1,41 \cdot 10^{-3}$	$1,69 \cdot 10^{-7}$	$4,76 \cdot 10^{-9}$	$1,77 \cdot 10^{-13}$	$8,22 \cdot 10^{-10}$	$2,89 \cdot 10^{-10}$	$2,95 \cdot 10^{-8}$	$5,90 \cdot 10^{-2}$
pH, ед. pH/units of pH	4,91	7,74	8,24	8,35	8,33	8,26	7,84	7,20
ЕС, мкС/см/ $\mu$ S/cm	68,0	158,2	158,7	172,6	169,4	185,4	121,8	184,4
мг/кг/mg/kg								
Li	1,313	17,312	17,547	21,767	17,025	16,612	19,221	0,830
Be	0,105	0,875	0,836	0,927	0,771	0,835	1,133	0,099
B	4,425	2,698	2,554	1,771	1,568	2,854	7,056	5,471
Na	51	108	137	173	124	111	112	133
Mg	891	5124	6453	8721	5330	4861	7727	1198
Al	1633	10979	10254	11363	8759	8579	14649	1443
Si	436	1797	2213	1563	1771	3139	3141	1024
P	353	401	400	451	403	426	412	1302
S	1677	331	364	250	195	401	464	2063
Cl	778	174	187	64	241	207	341	671
K	186	1254	1551	1826	1135	2260	1627	1008
Ca	9149	31972	38523	45733	44066	32857	12144	9172
Sc	0,408	3,392	3,553	4,249	3,438	3,442	3,838	0,286
Ti	15,375	25,144	24,963	23,559	19,953	25,268	24,890	17,436
V	4,408	27,934	29,010	28,469	31,198	27,618	30,933	5,586
Cr	3,631	24,706	26,035	31,565	24,407	21,873	31,003	2,900
Mn	90,0	295,0	642,2	672,2	618,8	976,7	209,6	170,5
Fe	2641	12736	17321	20474	13789	19494	17350	7136
Co	1,800	11,509	13,228	14,157	12,934	13,275	13,758	6,802
Ni	4,584	31,325	33,125	36,308	33,295	31,060	36,901	4,756
Cu	4,383	18,190	18,801	17,754	18,851	19,639	24,197	5,296
Zn	43,245	37,138	40,699	44,616	37,832	44,295	51,278	32,759
Ga	0,576	4,355	4,334	4,994	4,040	3,889	5,263	0,528
Ge	0,028	0,137	0,141	0,168	0,156	0,108	0,143	0,069
As	2,196	2,601	2,623	2,191	2,584	2,677	4,030	9,458
Se	0,475	0,850	0,854	0,881	0,991	0,823	1,199	0,626
Br	26,706	5,599	11,171	10,499	26,523	2,678	4,990	60,858
Rb	0,845	8,106	10,089	11,523	8,337	11,054	10,749	5,838
Sr	62,828	131,392	144,318	208,111	127,09	88,459	133,031	75,504
Y	1,091	10,853	11,519	12,328	10,841	11,666	14,364	1,143
Zr	1,345	7,905	9,313	9,707	9,641	9,761	9,805	1,176
Nb	0,088	0,133	0,099	0,063	0,071	0,147	0,198	0,090
Mo	1,035	0,104	0,117	0,041	0,078	0,259	0,242	5,339
Ru	0,0012	0,0056	0,0023	0,0035	0,0037	0,0003	0,0015	0,0003
Rh	0,0008	0,0012	0,0020	0,0033	0,0019	0,0016	0,0018	0,0012
Pd	0,0072	0,0488	0,0517	0,0613	0,0523	0,0469	0,0519	0,0012
Ag	0,1031	0,0478	0,0356	0,0362	0,0262	0,0316	0,0715	0,0420
Cd	0,1130	0,1179	0,1324	0,1468	0,1140	0,1666	0,1505	0,5172
In	0,0033	0,0165	0,0164	0,0189	0,0168	0,0164	0,0170	0,0049
Sn	0,0764	0,0322	0,0206	0,0166	0,0177	0,0204	0,0136	0,1629
Sb	0,1342	0,0241	0,0185	0,0165	0,0164	0,0181	0,0178	0,3367
Te	0,0093	0,0060	0,0185	0,0168	0,0056	0,0500	0,0155	0,0368
I	6,588	9,448	11,627	11,143	26,036	0,770	11,495	29,257
Cs	0,094	0,653	0,766	0,881	0,750	0,647	0,706	0,316
Ba	30,9	141,9	141,0	150,4	141,6	121,6	171,8	41,2
La	1,4058	14,6135	14,2380	13,8117	12,868	14,637	18,9763	1,7602
Ce	3,130	34,456	32,277	30,724	28,843	34,150	43,104	3,163
Pr	0,3549	3,7768	3,7055	3,5749	3,4099	3,9116	4,8226	0,3671
Nd	1,414	14,957	15,018	15,076	13,688	16,101	18,975	1,494
Sm	0,3035	3,1212	3,1819	3,1343	2,9195	3,3899	4,1614	0,3205
Eu	0,0704	0,7179	0,6993	0,6697	0,6336	0,7480	0,8841	0,0697
Gd	0,3181	3,2298	3,2365	3,2426	2,9614	3,4514	4,1541	0,3176
Tb	0,0436	0,4396	0,4369	0,4353	0,3966	0,4735	0,5535	0,0426

Окончание табл. 1

Table 1

Показатель Index	Средние значения (количество проб) Average values (amount of tests)			Минеральный грунт и почва 30.03.2018 г. в экосистемах Soils at 30.03.2018 in ecosystems:				
	торф peat (32)	ОМО organic soil (4)	грунт soil (7)	мочажина ГМК hollow of HRC	гряда ГМК ridge of HRC	Рям ryam	МО MSOB	лес (почва) forest (soil)
Dy	0,2293	2,3650	2,3994	2,3942	2,2443	2,5870	2,9931	0,2368
Ho	0,0413	0,4231	0,4271	0,4200	0,3921	0,4646	0,5529	0,0433
Er	0,1102	1,1373	1,1217	1,1190	1,0218	1,1862	1,4298	0,1073
Tm	0,0153	0,1527	0,1481	0,1471	0,1354	0,1600	0,1857	0,0141
Yb	0,0938	0,9630	0,9477	0,9805	0,8555	1,0526	1,1617	0,0893
Lu	0,0134	0,1348	0,1311	0,1295	0,1237	0,1421	0,1574	0,0125
Hf	0,0503	0,2699	0,3122	0,3582	0,3482	0,3093	0,2734	0,0483
Ta	0,0185	0,0046	0,0048	0,0007	0,0023	0,0009	0,0029	0,0114
W	0,0326	0,0197	0,0127	0,0007	0,0152	0,0082	0,0133	0,0953
Re	0,0007	0,0051	0,0058	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0014
Os	0,0074	0,0100	0,0172	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200	0,0050
Ir	0,0011	0,0007	0,0033	0,0000	0,0006	0,0005	0,0010	0,0000
Pt	0,0006	0,0017	0,0016	0,0019	0,0016	0,0023	0,0020	0,0006
Au	0,0103	0,0041	0,0017	0,0007	0,0019	0,0018	0,0014	0,0146
Hg	0,0939	0,0481	0,0450	0,0056	0,0275	0,1693	0,0391	0,4524
Tl	0,0165	0,0808	0,0796	0,0885	0,0714	0,0760	0,0964	0,0964
Pb	3,622	12,175	12,353	12,613	11,613	13,221	13,970	11,171
Bi	0,0388	0,1397	0,1563	0,1613	0,1490	0,1717	0,1505	0,0958
Th	0,281	4,428	4,875	5,016	4,762	5,203	5,081	0,095
U	0,756	0,996	0,934	1,303	0,847	0,585	1,121	0,154

Примечание: ГМК – грядово-мочажинный комплекс; рям – сосново-сфагново-кустарничковое болото; МО – мезотрофная окраина болота; ЕС – удельная электропроводность;  $k_w$  – коэффициент влагопроводности (1, 3).

Note: HRC is the hollow-ridge complex – mire type which combines low elongated ridges and hollows between them; ryam (Russian) is the oligotrophic pine-dwarf-shrub-sphagnum raised bog; MSOB is the mesotrophic border of an oligotrophic bog; EC – electric conductivity;  $k_w$  – factors of soil hydraulic conductivity (1, 3).

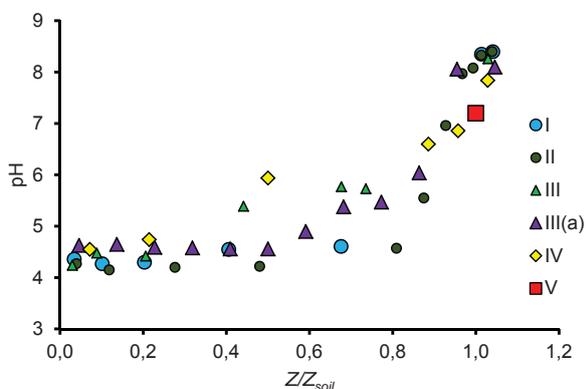


Рис. 2. Изменение значений pH водных вытяжек в зависимости от относительной глубины  $Z/Z_{soil}$  в различных экосистемах: Z – средняя глубина интервала опробования;  $Z_{soil}$  – верхняя граница залегания минерального грунта; экосистемы: I – мочажина ГМК в 2018 г.; II – гряда ГМК в 2018 г.; III и IIIa – рям в 2018 и 2017 гг., соответственно; IV – мезотрофное болото между заболоченным лесом и рьям; V – заболоченный смешанный лес

Fig. 2. Change of pH-values depending on relative depth  $Z/Z_{soil}$  in various ecosystems: Z is the average depth of appropriation interval;  $Z_{soil}$  is the top border of bottom (mineral) soils; ecosystems: I – hollow of the hollow-ridge complex in 2018; II – ridge of the hollow-ridge complex in 2018; III and IIIa – ryam in 2018 and 2017 accordingly; IV – the mesotrophic border of an oligotrophic bog; V – the boggy mixed forest

С учетом этого, а также с учетом изменений свойств грунтов, выявленных визуально при отборе проб, данные о химическом составе кислотных вытяжек были разделены по слоям: 1) торф на глубинах  $<0,3 Z/Z_{soil}$ ,  $0,3-0,7 Z/Z_{soil}$ ,  $>0,7 Z/Z_{soil}$ ; 2) органо-минеральные отложения; 3) минеральный грунт. Затем при уровне значимости 5 % выполнена проверка полученных данных на однородность по дисперсии и среднему для трех выборок – торфов, ОМО и минерального грунта. В результате установлено, что наиболее существенные различия закономерно отмечаются между торфами, с одной стороны, и минеральным грунтом и органо-минеральными отложениями, с другой. Гипотеза об однородности выборок не была отклонена только для концентраций В, Р, Sr, Rh, Cd, Te, I, W, Os, Pt, Au в паре «торф-ОМО» и концентраций Nb, Ru, W, Hg в паре «ОМО – минеральный грунт». Различия между ОМО и минеральным грунтом выявлены для значений pH и удельной электропроводности водных вытяжек, концентраций Mn, Br, Ru, In, Sb, Te, Ta, Ir, Au.

По полученным результатам все изученные химические элементы можно условно разделить на группы: 1) с относительно устойчивым увеличением от поверхности к минеральным грунтам и/или ярко выраженным максимумом в минеральных грунтах – Li, Al, Be, Mg, Ca, Sr, Fe, V, Cr, Mn, Ni, J, Ba, Cs, Ce, La, Sm, Eu, Dy, Tb, Yb, Lu, Ho, Gd, Th

**Таблица 2.** Состав минеральных включений в торфа, минеральный состав органо-минеральных отложений и минерального грунта в ряме в 2017 г.

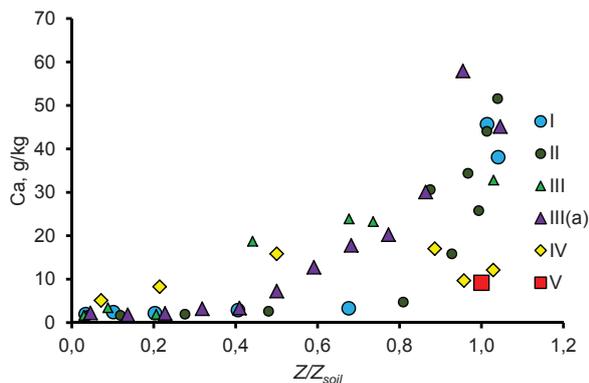
**Table 2.** Composition of mineral inclusions in peat, mineral composition of organic and bottom soils in oligotrophic pine-dwarf-shrub-sphagnum bog (ryam) in 2017

Грунт Soil – Peat	Интервал глубин, м Depth in- terval, m	Минеральный состав Mineral composition	$k_m$ , м/с m/s	рН, ед. pH units of pH	P	S
					мг/кг mg/kg	
Торф, очес Peat, root layer	0,00–0,25	включения: гидроксид (оксид) железа, монацит, барит, циркон, хромит, кварц, касситерит inclusions: iron hydroxide (oxide), monazite, barite, zircon, chromite, quartz, cassiterite	$9,1 \cdot 10^{-3}$	4,63	383	1135
Торф Peat	0,25–0,50	включения: гидроксид (оксид) железа, монацит, барит, циркон, ильменит, рутил, хромит inclusions: iron hydroxide (oxide), monazite, barite, zircon, ilmenite, rutile, chromite	$3,4 \cdot 10^{-4}$	4,65	356	2405
	0,50–0,75	включения: гидроксид (оксид) железа, циркон, хромит, кварц, каолинит, кальцит, пирит, галенит, сфалерит inclusions: iron hydroxide (oxide), zircon, chromite, quartz, kaolinite, calcite, pyrite, galena, sphalerite	$6,0 \cdot 10^{-5}$	4,59	237	1450
	0,75–1,00	включения: гидроксид (оксид) железа, монацит, ксенотим, циркон, хромит inclusions: iron hydroxide (oxide), monazite, xenotime, zircon, chromite	$1,7 \cdot 10^{-5}$	4,58	220	1578
	1,00–1,25	включения: барит, монацит, циркон, ильменит, рутил/inclusions: barite, monazite, zircon, ilmenite, rutile	$3,9 \cdot 10^{-6}$	4,56	179	1596
	1,25–1,50	включения: монацит, ксенотим, барит, циркон, ильменит, кальцит, кварц, пирит, галенит/inclusions: monazite, xenotime, barite, zircon, ilmenite, calcite, quartz, pyrite, galena	$3,2 \cdot 10^{-6}$	4,56	622	2137
	1,50–1,75	включения: гидроксид (оксид) железа, монацит, ксенотим, циркон inclusions: iron hydroxide (oxide), monazite, xenotime, zircon	$1,5 \cdot 10^{-6}$	4,90	420	2206
	1,75–2,00	включения: монацит, ксенотим, циркон, магнетит, кальцит, кварц, пирит, иллит inclusions: monazite, xenotime, zircon, magnetite, calcite, quartz, pyrite, illite	$9,9 \cdot 10^{-7}$	5,38	554	2716
	2,00–2,25	включения: кварц, монацит, циркон, кальцит, кварц, пирит, иллит, рутил, стибнит inclusions: quartz, monazite, zircon, calcite, quartz, pyrite, illite, rutile, stibnite	$4,0 \cdot 10^{-7}$	5,47	369	2519
	2,25–2,50	кварц (31,4 %), глауконит (3,3 %), иллит (44,8 %), хлорит (4,0 %), плагиоклаз (16,4 %); включения: монацит, ксенотим, циркон, ильменит, золото quartz (31,4 %), glauconite (3,3 %), illite (44,8 %), chlorite (4,0 %), plagioclase (16,4 %); inclusions: monazite, xenotime, zircon, ilmenite, gold	$3,7 \cdot 10^{-7}$	6,04	491	2018
ОМО Organic soil	2,50–2,75	кварц (37,9 %), кальцит (16,6 %), иллит (16,4 %), хлорит (9,5 %), КПШ (8,5 %), плагиоклаз (11,1 %); включения: гидроксид (оксид) железа, монацит, циркон, ильменит, титаномагнетит, рутил, хромит quartz (37,9 %), calcite (16,6 %), illite (16,4 %), chlorite (9,5 %), potassium feldspars (8,5 %), plagioclase (11,1 %); inclusions: iron hydroxide (oxide), monazite, zircon, ilmenite, titanomagnetite, rutile, chromite	$5,1 \cdot 10^{-9}$	8,06	255	261
Минеральный грунт Soil	2,75–3,00	кварц (34,1 %), кальцит (17,2 %), иллит (16,6 %), хлорит (11,2 %), КПШ (8,6 %), плагиоклаз (12,3 %); включения: гидроксид (оксид) железа, ксенотим, пирит, галенит, сфалерит, барит, целестин, циркон, ильменит, титаномагнетит quartz (34,1 %), calcite (17,2 %), illite (16,6 %), chlorite (11,2 %), potassium feldspars (8,6 %), plagioclase (12,3 %); inclusions: iron hydroxide (iron oxide), xenotime, pyrite, galena, sphalerite, barite, celestite, zircon, ilmenite, titanomagnetite	$2,5 \cdot 10^{-10}$	8,10	268	225

(рис. 3), а также с небольшим (по сравнению с максимумом в минеральном грунте) повышением концентраций в верхней части разреза Cu, Ga, Ge, Rb, Zr, Hf; 2) с хорошо выраженными максимумами в верхней и нижней частях разреза – Na, K, Ti, Pb, Hg, Rb, Cd, Sb, Sn, W, Bi, Si, в том числе с резко выраженной дифференциацией по разрезу Pb и Bi (рис. 4); 3) с иными типами распределения (включая максимумы в слоях торфа или в ОМО) – S, P, U, Au, Ag, Pt, Zn, As, Re, Os, B, Br, Ta (рис. 5).

Для рН и удельной электропроводности водных вытяжек, концентраций большинства изученных элементов в кислотных вытяжках наблюдается уменьшение концентраций в направлении «минеральный грунт→ОМО→торф» (Li, Na, Mg, Si, K, Ca, Sc, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Rh, Pd, Cd, I, Cs, Nd, Sm, Gd, Dy, Ho, Hf, Re, Os, Pb, Bi, Th). Обратная зависимость (увеличение концентраций в направлении «минеральный грунт→ОМО→торф») выявлена для B, Ag, Sn, Sb,

W, Au, Hg. Также следует отметить, что максимумы в торфах установлены для S, Cl, Zn, Br, Mo, Ta. Максимальные концентрации в ОМО при общем снижении в ряду «ОМО – минеральный грунт – торф» зафиксированы для достаточно большого количества химических элементов: Be, Al, P, Ti, Ga, Nb, Ru, In, Ba, La, Ce, Pr, Eu, Tb, Er, Tm, Yb, Lu, Pt, Tl, U.

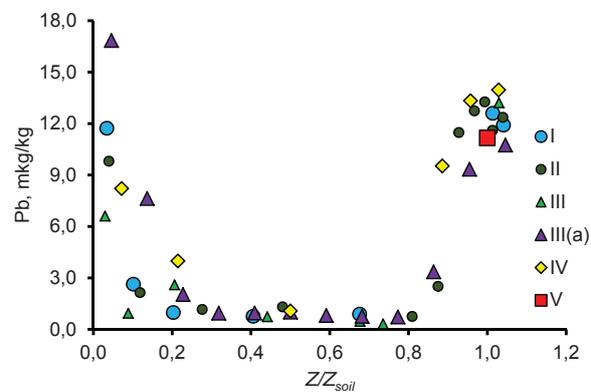


**Рис. 3.** Изменение концентраций Ca в кислотных вытяжках в зависимости от относительной глубины  $Z/Z_{soil}$  в различных экосистемах: Z – средняя глубина интервала опробования;  $Z_{soil}$  – верхняя граница залегания минерального грунта; экосистемы: I – мочажина ГМК в 2018 г.; II – гряда ГМК в 2018 г.; III и IIIa – рям в 2018 и 2017 гг. соответственно; IV – мезотрофное болото между заболоченным лесом и рямом; V – заболоченный смешанный лес

**Fig. 3.** Change of Ca concentration depending on relative depth  $Z/Z_{soil}$  in various ecosystems: Z is the average depth of approbation interval;  $Z_{soil}$  is the top border of bottom (mineral) soils; ecosystems: I – hollow of the hollow-ridge complex in 2018; II – ridge of the hollow-ridge complex in 2018; III and IIIa – ryam in 2018 and 2017 accordingly; IV – the mesotrophic border of an oligotrophic bog; V – the boggy mixed forest

Связь концентраций химических элементов в кислотных вытяжках из ОМО и минерального грунта с соответствующим минеральным составом отмечена, прежде всего, между РЗЭ, с одной стороны, и содержанием минералов группы смектита и смешаннослойных минералов в % от суммы глинистых минералов (рис. 6) – с другой. Соответствующие коэффициенты корреляции составляют от 0,55 до 0,80, причем с содержанием каолинита статистически значимые связи не выявлены. Монтмориллонит и другие минералы группы смектита обладают более высокой сорбционной способностью, чем минералы группы каолинита, а при одновременном их набухании и насыщении натрием вероятно снижение проницаемости и разрушение структуры [45], что, видимо, и является причиной возможных в болотной среде превращений монтмориллонита в каолинит [46]. Этот процесс, прежде всего, протекает в пределах мезотрофной окраины, где имеется источник вещества (по данным А.И. Сысо [47], монтмориллонит обычно входит в состав илистой фракции почв ра-

йона, примыкающего к Васюганскому болоту с юга и характеризующегося более высокими высотными отметками), а на границе болота (вследствие различной водопроницаемости болотной и лесной экосистем) скапливаются водные массы [48]. Это и подтверждается данными о повышенном содержании смектита на этом участке (рис. 6).

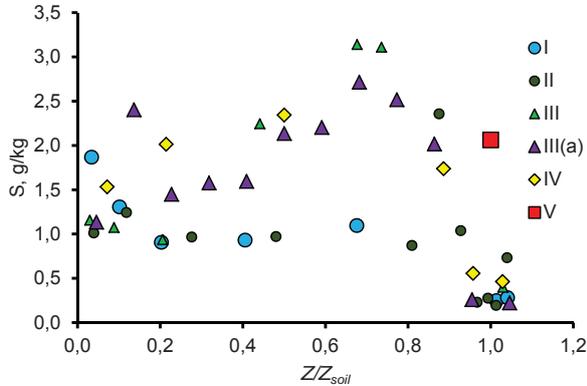


**Рис. 4.** Изменение концентраций Pb в кислотных вытяжках в зависимости от относительной глубины  $Z/Z_{soil}$  в различных экосистемах: Z – средняя глубина интервала опробования;  $Z_{soil}$  – верхняя граница залегания минерального грунта; экосистемы: I – мочажина ГМК в 2018 г.; II – гряда ГМК в 2018 г.; III и IIIa – рям в 2018 и 2017 гг. соответственно; IV – мезотрофное болото между заболоченным лесом и рямом; V – заболоченный смешанный лес

**Fig. 4.** Change of Pb concentration depending on relative depth  $Z/Z_{soil}$  in various ecosystems: Z is the average depth of approbation interval;  $Z_{soil}$  is the top border of bottom (mineral) soils; ecosystems: I – hollow of the hollow-ridge complex in 2018; II – ridge of the hollow-ridge complex in 2018; III and IIIa – ryam in 2018 and 2017 accordingly; IV – the mesotrophic border of an oligotrophic bog; V – the boggy mixed forest

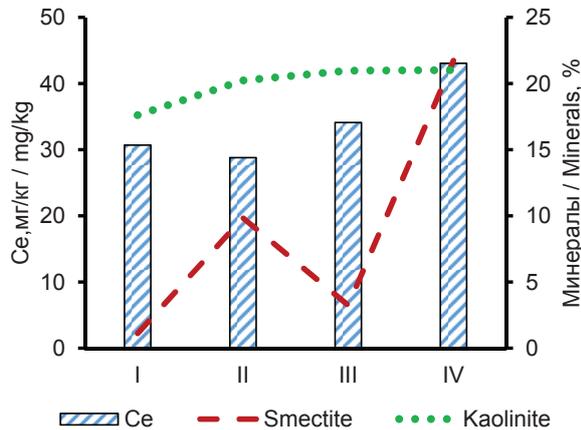
При разрушении минералов группы смектита (в составе атмосферного аэрозоля на олиготрофных участках и выноса с суходолов на мезотрофной окраине болота) в водную среду, предположительно, поступает определенное количество химических элементов, включая РЗЭ, находившихся ранее в структуре минерала либо сорбированных на его поверхности. В дальнейшем уровень содержания химических элементов в деятельном горизонте (до 0,3–0,5 м от поверхности), в пределах которого преобладает окислительная обстановка, определяется биоаккумуляцией и способностью образовывать с органическими веществами либо устойчивые комплексы, способствующие миграции и накоплению в болотных водах (например, комплексы  $Fe^{3+}$  и фульвокислот ФК), либо малорастворимые соединения (соединения гуминовых кислот ГК с Ca, Mg и рядом других металлов за исключением K и Na) [49–51]. Одновременно происходит образование малорастворимых фосфатов и их осаднение с гидроксидами и оксидами железа по всей глубине торфяной залежи и кальцитом – в ее нижней части, в которой увеличивается и присутствие твердого вещества, и содержание углекисло-

го газа в результате разложения органического вещества, что подтверждается данными о включениях в торфа фосфатов РЗЭ, а также опубликованными сведениями других авторов о минералообразовании в болотах и почвах [22, 52].



**Рис. 5.** Изменение концентраций  $S$  в кислотных вытяжках в зависимости от относительной глубины  $Z/Z_{soil}$  в различных экосистемах:  $Z$  – средняя глубина интервала опробования;  $Z_{soil}$  – верхняя граница залегания минерального грунта; экосистемы: I – мочажина ГМК в 2018 г.; II – гряда ГМК в 2018 г.; III и IIIa – рям в 2018 и 2017 гг. соответственно; IV – мезотрофное болото между заболоченным лесом и рямом; V – заболоченный смешанный лес

**Fig. 5.** Change of  $S$  concentration depending on relative depth  $Z/Z_{soil}$  in various ecosystems:  $Z$  is the average depth of approbation interval;  $Z_{soil}$  is the top border of bottom (mineral) soils; ecosystems: I – hollow of the hollow-ridge complex in 2018; II – ridge of the hollow-ridge complex in 2018; III and IIIa – ryam in 2018 and 2017 accordingly; IV – the mesotrophic border of an oligotrophic bog; V – the boggy mixed forest



**Рис. 6.** Изменение концентраций  $Ce$  в кислотных вытяжках, доли смектита и каолинита в верхнем слое минерального грунта в 2018 г. в различных экосистемах: I – мочажина ГМК; II – гряда ГМК; III – рям; IV – мезотрофное болото между заболоченным лесом и рямом

**Fig. 6.** Change of  $Ce$  concentration in acid extracts, shares of smectite and kaolinite in the top layer of bottom (mineral) soils in 2018 in various ecosystems: I – hollow of the hollow-ridge complex in 2018; II – ridge of the hollow-ridge complex in 2018; III – ryam; IV – the mesotrophic border of an oligotrophic bog

В общих чертах такой механизм характерен не только для РЗЭ, но и для многих других элементов. Например, кремний, поступающий в болотную среду первоначально при выщелачивании первичных алюмосиликатов [5, 53], находящихся в составе частиц минерального грунта суходола или частиц атмосферного аэрозоля, усваивается болотной растительностью в летний период и аккумуляруется в болотных водах в осенне-зимний период. В результате максимальные концентрации  $Si$  в болотных водах мезотрофной окраины обычно наблюдаются в зимний период вследствие накопления продуктов разложения растительного материала, а минимальные – в весенний, когда происходит разбавление болотных вод талыми снеговыми. В пределах рьяма нет такого интенсивного поступления снеготалых вод, как на окраине болота. Поэтому разбавление происходит в меньшей степени, а в сезонном изменении концентраций  $Si$  наиболее очевидной тенденцией является определенное их снижение в летний период [6].

В разрезе торфяной залежи, как было указано выше, с глубиной торфяной залежи происходит ухудшение фильтрационных свойств (рис. 1) и доступа кислорода, что способствует формированию в пределах инертного горизонта торфяной залежи восстановительной обстановки за счет автотрофной и гетеротрофной сульфатредукции. Согласно [54], в первом случае происходит окисление водорода с последующим увеличением рН, а во втором – окисление органических веществ и уменьшение рН, которое при определенных условиях может компенсироваться процессами метанообразования, протекающими и на территории Васюганского болота [55]. Наблюдаемое распределение рН водных вытяжек из торфов (рис. 2) свидетельствует, видимо, о наличии таких условий на рассматриваемом участке Васюганского болота либо о преобладании автотрофной сульфатредукции на олиготрофных участках болота. В любом случае увеличение рН соответствует повышению концентраций  $CO_3^{2-}$  и возможности осаждения кальцита, что подтверждается данными о минеральном составе ОМО и минерального грунта в пределах олиготрофных внутриболотных экосистем, а также данными о содержании в торфах фульво- и гуминовых кислот, включая фракцию ГК-2, предположительно связанную с кальцием [31, 32].

Торфяная залежь формируется в результате комплекса дискретных случайных процессов, в результате которых она представляет собой принципиально неоднородную по фильтрационным и геохимическим свойствам среду, причем не всегда понятно, нужно ли рассматривать болото как единую экосистему, либо как комплекс сопряженных экосистем. Например, мезотрофная окраина рассматриваемого участка формируется за счет «наполнения» олиготрофного болота на покрытый смешанным лесом суходол вследствие создания и перемещения в сторону леса переувлажненной полосы, а рям, наблюдаемый в настоящее время, сформиро-

вался, видимо, на месте размещения малых водоемов, которые со временем превратились в эвтрофное болото. Соответственно, направленные пространственно-временные изменения концентраций химических элементов в торфах, ОМО, минеральном грунте и болотных водах могут рассматриваться, во-первых, в статистическом смысле в среднем для выделенного таксономического элемента болотной экосистемы и/или этапа ее эволюции. Во-вторых, в пограничных слоях болотной экосистемы из-за дифференциации источников вещества и условий его аккумуляции и миграции вероятно формирование геохимических и биогеохимических барьеров, которые затем испытывают воздействие факторов, возникших уже в новой среде.

В результате этого наблюдаемые изменения концентраций многих химических элементов выражены недостаточно ярко, но тем не менее не являются хаотическими, а вполне закономерны. Например, содержания фосфора в верхнем слое, сформировавшемся преимущественно в условиях атмосферного водно-минерального питания и сезонного потребления болотной растительностью, заметно меньше содержаний в нижележащем слое, сложенном низинными и переходными торфами, в которых в составе минеральных включений кальцит встречается несколько чаще, чем в слое 0,00–1,25 м. В нижнем же слое колебания концентраций Р могут быть связаны с сорбцией анионных форм этого элемента на агрегатах, в составе которых присутствуют карбонаты и гуматы кальция, гидроксиды железа и алюминия [50, 51, 56, 57]. Еще один пример – распределение по разрезу серы, повышенные концентрации которой в общих чертах приурочены к границам деятельного и инертного горизонта (смена окислительной обстановки на восстановительную), верховых и переходных, переходных и низинных торфов (табл. 2).

Нельзя обойти вниманием и распределение по разрезу торфяной залежи свинца, повышенные концентрации которого часто связывают с антропогенным влиянием. В частности, в торфяниках Европы пики концентраций этого элемента иногда сопоставляются с развитием промышленности современных и древних государств [58]. В пределах рассматриваемого участка Васюганского болота максимальные концентрации Рb (16,9 мг/кг) действительно обнаружены в верхнем слое торфяной залежи ряма (0,00–0,25 м), но почти такие же концентрации 11–14 мг/кг отмечены на глубинах 2,5–4,5 м (то есть 2,5–4,5 тыс. лет назад) в торфах, ОМО, минеральном грунте и почве в заболоченном лесу. Сложно предположить, что добыча и переработка свинцовых руд в Римской империи или других, в том числе еще более древних государствах, повлияли на химический состав торфов в районе, удаленном на тысячи километров. Более правдоподобным, видимо, является предположение о поступлении Рb, Zn, Ti, Hg, U и ряда других элементов с атмосферным аэрозолем и/или с твердым стоком с

прилегающих территорий и о последующем накоплении вследствие преобладания скорости аккумуляции над скоростью выноса [5]. В частности, в инертном горизонте торфяной залежи вероятно образование сульфидных минералов Рb, Zn, Fe ниже границы распространения микрофлоры, потребляющей восстановленные соединения серы, при условии минимального уровня содержаний веществ (например, ионов  $Al^{3+}$  и  $NO_2^-$ ), которые препятствуют ее существованию [14]).

Среди факторов, определяющих формирование геохимических барьеров, следует отметить, прежде всего, резкое сокращение доступа кислорода в верхнем деятельном слое 0,25–0,50 м, биоаккумуляцию, ее сезонные и многолетние изменения, условия пространственно-временной дифференциации водно-минерального питания, включая условия выноса или трансформации токсичных для микро- и макрофлоры продуктов, различную доступность твердого вещества, различия фильтрационных свойств органического и минерального грунта и их многолетнюю динамику с учетом типов и видов торфа. В последних двух случаях важно отметить, что изменения минерального состава грунтов в болотной среде могут сопровождаться кольматацией придонного слоя торфяной залежи в процессе возникновения и эволюции болота, в том числе, за счет осаждения малорастворимых соединений. При условии отсутствия значимого бокового водного, твердого и химического притока с прилегающих суходолов это может быть важным дополнительным фактором изменения типа болотной экосистемы (с эвтрофного на мезотрофный и с мезотрофного на олиготрофный) и концентрации химических элементов на границе слоев с разными фильтрационными, физико-химическими и геохимическими свойствами.

### Заключение

Как показал анализ химического состава кислотных вытяжек из торфов, органико-минеральных отложений и минерального грунта с использованием метода масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, все изученные химические элементы можно условно разделить на группы: 1) с относительно устойчивым увеличением от поверхности к минеральным грунтам и/или ярко выраженным максимумом в минеральных грунтах – Li, Al, Be, Mg, Ca, Sr, Fe, V, Cr, Mn, Ni, J, Ba, Cs, Ce, La, Sm, Eu, Dy, Tb, Yb, Lu, Ho, Gd, Th, в том числе с небольшим (по сравнению с максимумом в минеральном грунте) повышением концентраций в верхней части разреза Cu, Ga, Ge, Rb, Zr, Hf; 2) с хорошо выраженными максимумами в верхней и нижней частях разреза – Na, K, Ti, Pb, Hg, Rb, Cd, Sb, Sn, W, Bi, Si, в том числе, с резко выраженной дифференциацией по разрезу Рb и Bi; 3) с иными типами распределения – S, P, U, Au, Ag, Pt, Zn, As, Re, Os, B, Br, Та.

Основными факторами пространственных изменений химического состава торфов, ОМО и ми-

нерального грунта в целом являются природные биогеохимические условия, интенсивность водообмена, соотношение атмосферного и грунтового водного и минерального питания, определяющие общую доступность воды и питательных веществ для болотной растительности, отвод токсичных для этой растительности веществ. Перечисленные факторы изменяются во времени как внутри года, так и в многолетнем разрезе, причем изменения часто носят случайный и дискретный характер и соответствуют изменению типа болотных экосистем и торфов. Влияние антропогенных факторов исключить нельзя, но непосредственно на рассматриваемом участке Васюганского болота их роль минимальна. Например, наблюдаемые повышенные концентрации Na, K, Bi, Ti, Pb и других элементов в деятельном горизонте торфяной залежи с большей вероятностью объясняются выщелачиванием и растворением минералов, входящих в состав регионального атмосферного аэрозоля. Безусловно, атмосферный аэрозоль может иметь и природно-антропогенное происхождение [59], но сопоставление с данными о химическом составе горных пород и почв на юге Томской области и прилегающих территориях [47, 60–62] все же свидетельствует о преобладании природных факторов (например, судя по содержанию Ti).

В процессе замедленного, но все же имеющего место быть водообмена происходит вынос свинца и других химических элементов по линиям стекания в деятельном горизонте (с определенной аккумуляцией в грядах грядово-мочажинного ком-

плекса и ряме), а также поступление в инертный горизонт, где вероятно образование сульфидных минералов, включая галенит и пирит (табл. 2). В годы с различной водностью скорость выноса меняется прямо пропорционально атмосферному увлажнению, что объясняет обнаружение в ряме наиболее высокой концентрации Pb (16,9 мг/кг) в марте 2017 г. после засушливой осени 2016 г. (сумма осадков за сентябрь–ноябрь – 73 мм). Осенью 2017 г. выпало заметно больше атмосферных осадков (сумма осадков за сентябрь–ноябрь – 93 мм). Соответственно, увеличилась скорость гидрохимического выноса, а максимальная концентрация свинца в марте 2018 г. составила уже 6,6 мг/кг.

Необходимо отметить, что в речных системах и подземных водах зоны гипергенеза обычно наблюдается обратная зависимость между интенсивностью водообмена и уровнем содержания в воде веществ [44, 63]. На самом деле, как было показано в [64], противоречий нет, поскольку для всего диапазона изменений эта зависимость при определенных условиях имеет вид, близкий к гамма-функции. Нелинейный характер имеет и большинство других зависимостей, описывающих взаимосвязи между геологическими, геохимическими, биогеохимическими и гидрологическими процессами, что и сказывается на характере распределения химических элементов по глубине и территории болотных экосистем.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства РФ (контракт № 14.Z50.31.0012).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болотные воды Томской области / Н.М. Рассказов, П.А. Удодов, А.Д. Назаров, Т.Я. Емельянова // Известия Томского политехнического института. – 1975. – Т. 297. – С. 102–117.
2. Геохимия растений и торфов Большого Васюганского болота / В.К. Бернатонис, В.С. Архипов, М.А. Здвизжков, Ю.И. Прейс, Н.О. Тихомирова // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002. – С. 204–215.
3. Среднее содержание некоторых элементов-примесей в торфах юго-восточной части Западно-Сибирской плиты / С.И. Арбузов, В.С. Архипов, В.К. Бернатонис, В.А. Бобров, С.Г. Маслов, А.М. Межибор, Ю.И. Прейс, Л.П. Рихванов, А.Ф. Судыко, А.И. Сысо // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 1. – С. 44–48.
4. Архипов В.С., Бернатонис В.К. Распределение кальция и железа в вертикальном профиле торфяных залежей таёжной зоны Западной Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 1. – С. 173–178.
5. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода: в 5 т. Т. 2. Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепкурова / отв. ред. Б.Н. Рыженко. – Новосибирск: СО РАН, 2007. – 389 с.
6. Савичев О.Г., Мазуров А.К. Временные изменения химического состава вод в восточной части Васюганского болота (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 38–48.
7. Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia / S.I. Arbutov, S.G. Maslov, R.B. Finkelman, A.M. Mezhibor, S.S. Plenok, M.G. Blokhin, E.V. Peregudina // Journal of Geochemical Exploration. – 2017. – V. 10. – P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jgexplo.2017.10.012> (дата обращения 12.10.2017).
8. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / О.Л. Лисс, Л.И. Абрамова, Н.А. Аветов, Н.А. Березина, Л.И. Инишева, Т.В. Курнишкова, З.А. Слука, Т.Ю. Толпышева, Н.К. Шведчикова / под ред. В.Б. Куваева. – Тула: Гриф и К, 2001. – 584 с.
9. Пологова Н.Н., Лапшина Е.Д. Накопление углерода в торфяных залежах Большого Васюганского болота // Большое Васюганское болото. Современное состояние и процессы развития / под ред. М.В. Кабанова. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002. – С. 174–179.
10. Eurasian Mires of the Southern Taiga Belt: Modern Features and Response to Holocene Palaeoclimate / Т. Minayeva, W. Bleuten, A. Sirin, E.D. Lapshina // Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies. V. 190 / Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – P. 315–341.
11. Савичев О.Г. Геохимические показатели болотных вод в таёжной зоне Западной Сибири // Известия РАН. Серия географическая. – 2015. – № 4. – С. 47–57.
12. Savichev O.G. Distribution of Inorganic Pollutants over the Depth of Upper Peat Deposit // Contemporary Problems of Ecology. – 2015. – V. 8. – № 1. – P. 118–124.
13. Прогноз изменения макрокомпонентного состава болотных вод при добыче железных руд в Томской области / О.Г. Савичев

- чев, А.К. Мазуров, Н.В. Гусева, В.А. Домаренко, А.А. Хвощевская // География и природные ресурсы. – 2016. – № 1. – С. 94–102.
14. Гидрогеохимические условия формирования олиготрофных болотных экосистем / О.Г. Савичев, А.К. Мазуров, И.П. Семилетов, В.А. Базанов, Н.В. Гусева, А.А. Хвощевская, Н.Г. Наливайко // Известия РАН. Серия географическая. – 2016. – № 5. – С. 60–69. URL: <http://dx.doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-60-69> (дата обращения 03.11.2017).
15. Домаренко В.А., Савичев О.Г., Перегудина Е.В. Особенности распределения химических элементов в болотных экосистемах Восточного Васюганья // Разведка охрана недр. – 2017. – № 8. – С. 50–55.
16. The evolution of authigenic Zn–Pb–Fe-bearing phases in the Grievess Siding peat, western Tasmania / R. Awid-Pascual, V.S. Kamenetsky, K. Goemann, N. Allen, T.L. Noble, B.G. Lottermoser, T. Rodemann // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2015. – № 170. – P. 17. DOI: 10.1007/s00410-015-1167-y.
17. Mineral components in a peat deposit: looking for signs of early mining and smelting activities in Silesia-Cracow region (Southern Poland) / J. Cabala, B. Smieja-Król, M. Jablonska, L. Chrost // Environmental Earth Sciences. – 2013. – № 69. – P. 2559–2568. DOI: 10.1007/s12665-012-2080-6.
18. Formation of sphalerite (ZnS) deposits in natural biofilms of sulfate-reducing bacteria / M. Labrenz, G.K. Druschel, T. Thomsen-Ebert, B. Gilbert, S.A. Welch, K.M. Kemner, G.A. Logan, R.E. Summons, G. Stasio, P.L. Bond, B. Lai, S.D. Kelly, J.F. Banfield // Science. – 2000. – № 290. – P. 1744–1747.
19. Shotyk W. Review of the inorganic geochemistry of peats and peatland waters // Earth-Science Reviews. – 1988. – № 25. – P. 95–176. DOI: 10.1016/0012-8252(88)90067-0.
20. Kamenov G.D., Brenner M., Tucker J.L. Anthropogenic versus natural control on trace element and Sr–Nd–Pb isotope stratigraphy in peat sediments of southeast Florida (USA), 1500 AD to present // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2009. – № 73. – P. 3549–3567. DOI: 10.1016/j.gca.2009.03.017.
21. Potentials and problems of building detailed dust records using peat archives: An example from Store Mosse (the «Great Bog»), Sweden / M.E. Kylander, A. Martínez-Cortizas, R. Bindler, S.L. Greenwood, C.-M. Mörth, S. Rauch // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2016. – № 190. – P. 156–174. DOI: 10.1016/j.gca.2016.06.028.
22. Origins of mineral matter in peat marsh and peat bog deposits, Spain / A.M. López-Buendía, M.K.G. Whateley, J. Bastida, M.M. Urquiola // International Journal of Coal Geology. – 2007. – V. 71. – P. 246–262. DOI: 10.1016/j.coal.2006.09.001.
23. Heavy metal release by peat erosion in the Peak District, southern Pennines, UK / J.J. Rothwell, S.G. Robinson, M.G. Evans, J. Yang, T.E.H. Allott // Hydrological Processes. – 2005. – № 19. – P. 2973–2989. DOI: 10.1002/hyp.5811.
24. Smieja-Król B., Fiałkiewicz-Kozioł B. Quantitative determination of minerals and anthropogenic particles in some Polish peat occurrences using a novel SEM point-counting method // Environmental Monitoring and Assessment. – 2014. – № 186. – P. 2573–2587. DOI: 10.1007/s10661-013-3561-0.
25. Steinmann P., Shotyk W. Geochemistry, mineralogy, and geochemical mass balance on major elements in two peat bog profiles (Jura Mountains, Switzerland) // Chemical Geology. – 1997. – № 138. – P. 25–53. DOI: 10.1016/S0009-2541(96)00171-4.
26. Syrovetsnik K., Puura E., Neretnieks I. Accumulation of heavy metals in Oostriku peat bog, Estonia: -Site description, conceptual modelling and geochemical modelling of the source of the metals // Environmental Geology. – 2004. – № 45. – P. 731–740. DOI: 10.1007/s00254-003-0931-x.
27. Comparative evaluation of the mineralogical composition of Sphagnum peat and their corresponding humic acids, and implications for understanding past dust depositions / C. Zaccone, S. Pabst, G.S. Senesi, W. Shotyk, T.M. Miano // Quaternary International. – 2013. – № 306. – P. 80–87. DOI: 10.1016/j.quaint.2013.04.017.
28. Оценка потоков минерального вещества по свойствам торфяных отложений Бакчарского болота (южная тайга Западной Сибири) / Ю.И. Прейс, В.А. Бобров, В.В. Будашкина, В.М. Гавшин // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – № 1. – С. 43–47.
29. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia // Ecological Engineering. – 2015. – V. 80. – P. 100–107.
30. Торфяные ресурсы Томской области. Справочник по состоянию изученности на 01.01.1998 г. – Новосибирск: СНИИГ-ГИМС, 1998. – 405 с.
31. Савичева О.Г., Инишева Л.И. Биологическая активность торфяных болот // Сибирский экологический журнал. – 2000. – № 5. – С. 607–614.
32. Научно-исследовательский полигон «Васюганье». Программа научной экскурсии / Л.И. Инишева, Т.В. Дементьева, Е.А. Головацкая, Е.В. Порохина. – Томск: ЦНТИ, 2003. – 88 с.
33. ГОСТ 21123–85. Торф. Термины и определения. Дата введения 01.07.1986 г. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 85 с.
34. Лиштван И.И., Базин Е.Т., Косов В.И. Физические процессы в торфяных залежах. – Минск: Наука и техника, 1989. – 287 с.
35. Маслов Б.С. Гидрология торфяных болот. – М.: Россельхозакадемия, 2009. – 266 с.
36. Иванов К.Е. Водообмен в болотных ландшафтах. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 280 с.
37. Емельянова Т.Я., Крамаренко В.В. Характеристики фильтрационных свойств торфов Томской области // Обской вестник. – 2001. – № 1. – С. 36–39.
38. Крамаренко В.В. Характеристика торфяных грунтов Васюганского болота (междуречья Бакчар – Икса – Шегарка) // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 6. – С. 28–31.
39. Природные ресурсы центральной части Западно-Сибирской равнины / под ред. Г.В. Добровольского, Е.М. Сергеева, А.С. Герасимовой. – М.: Изд-во МГУ, 1977. – 211 с.
40. Мелиорация и водное хозяйство. Т. 3. Осушение / под ред. Б.С. Маслова. – М.: Агропромиздат, 1985. – 447 с.
41. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
42. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – № 10 (3). – P. 282–290.
43. Пособие по определению расчётных гидрологических характеристик / под ред. Т.С. Шмидта. – Л.: Гидрометеоздат, 1984. – 448 с.
44. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // Geochemistry International. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
45. Drever J.I. The geochemistry of natural waters. – Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1982. – 440 p.
46. Тимофеев П.П., Боголюбова Л.И. Геохимия органического вещества голоценовых отложений в областях приморского торфонакопления. – М.: Наука, 1999. – 220 с.
47. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. – Новосибирск, 2004. – 32 с.
48. Савичев О.Г., Бернатонис П.В., Бернатонис В.К. Гидрологическое обоснование хозяйственного освоения торфяных болот (на примере водосбора реки Ключ, Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 1. – С. 155–162.
49. Ephraim J.H., Allard B. Metal Ion Binding by Humic Substances // Modelling in Aquatic Chemistry / Eds. I. Grenthe, I. Puigdomen-

- ech. – Paris, France: OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. – P. 207–244.
50. Solubility, Mobility, and Bioaccumulation of Trace Elements: Abiotic Processes in the Rhizosphere / B. Robinson, N. Bolan, S. Mahimairaja, B. Clothier // Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation / Eds. M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan. – New York, USA: Taylor & Francis Group, 2006. – P. 97–110.
51. Мотузова Н.В. Соединения микроэлементов в почвах. Системная организация, экологическое значение, мониторинг. – М.: ЛИБРОКОМ, 2013. – 168 с.
52. Geochemistry of carbonatic/sulphatic soils in the southern Angara region, Russia / Yu.N. Vodyanitskii, N.D. Kiseleva, O.G. Lopatovskaya, A.T. Savichev // Annals of agrarian science. – 2016. – № 14. – P. 140–151. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aasci.2016.05.016> (дата обращения 20.08.2018).
53. Наймушина О.С. Геохимическая эволюция природных вод нижней части бассейна реки Томи: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2014. – 22 с.
54. Крайнов С.Р., Швец В.М. Геохимия подземных вод хозяйственно-питьевого назначения. – М.: Недра, 1987. – 237 с.
55. Особенности метаногенеза на олиготрофных болотах Западной Сибири и оценка факторов среды в связи с корректной экстраполяцией потоков CH<sub>4</sub> на большие территории / Т.Т. Ефремова, Н.М. Бажин, И.М. Гаджиев, С.П. Ефремов, Г.А. Махов // Сибирский экологический журнал. – 1998. – № 6. – С. 563–570.
56. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / отв. ред Н.П. Лавёров. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
57. Савенко А.В. О взаимосвязанности внутриводоемных циклов фосфора и железа // Водные ресурсы. – 1998. – Т. 25. – № 3. – С. 330–334.
58. Shotyk W. Peat bog archives of atmospheric metal deposition: geochemical evaluation of peat profiles, natural variations in metal concentration, and metal enrichment factors // Environmental Reviews. – 1996. – V. 4. – P. 149–183.
59. Шатилов А.Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика пылевых атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2001. – 22 с.
60. Циркон-ильменитовые россыпные месторождения как потенциальный источник развития Западно-Сибирского региона / Л.П. Рихванов, С.С. Кропанин, С.А. Бабенко, А.И. Соловьев, В.М. Советов, Т.Ю. Усова, М.А. Полякова. – Кемерово: Сарс, 2001. – 214 с.
61. Калинин Ю.А., Росляков Н.А. Экогеохимия почв равнинных ландшафтов юга Западной Сибири // Обской вестник. – 1999. – № 3–4. – С. 82–90.
62. Шайхиев И.Р., Рихванов Л.П. Эколого-геохимические исследования природных сред района Бакчарского железорудного месторождения (Томская область) // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – Т. 326. – № 5. – С. 62–78.
63. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1970. – 444 с.
64. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources / V.L. Luyen, O.G. Savichev, V.A. Domarenko, Q.D. Tin // Vietnam Journal of Earth Sciences. – 2017. – V. 39. – № 2. – P. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.

Поступила 30.08.2018 г.

#### Информация об авторах

**Савичев О.Г.**, доктор географических наук, профессор Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Мазуров А.К.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Рудмин М.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Хващевская А.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Даулетова А.Б.**, студент Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.46

## CHANGES IN CHEMICAL COMPOSITION OF ACID EXTRACTS ON DEPTH OF PEAT DEPOSIT OF THE VASYUGAN MIRE ECOLOGICAL SYSTEMS (WESTERN SIBERIA)

Oleg G. Savichev<sup>1</sup>,  
OSavichev@mail.ru

Aleksey K. Mazurov<sup>1</sup>,  
AKM@tpu.ru

Maxim A. Rudmin<sup>1</sup>,  
RudminMA@tpu.ru

Albina A. Hvashchevskaya<sup>1</sup>,  
Garibova@yandex.ru

Aigerim B. Dauletova<sup>1</sup>,  
lkerimdb@gmail.com

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance.** The analysis of changes in chemical and mineral composition of peat and soils is the important stage of searches of minerals, development of corresponding methodology, and methodology of ecological monitoring as well.

**The aim** of the research is to reveal the changes in chemical composition of peat and soil acid extracts in east part of the Vasyugan mire.

**Methods:** landscape-geochemical and statistical methods, methods of definition of chemical and mineral composition of peat and soils, imitating mathematical modelling.

**Results and conclusions.** According to approbation of peats and mineral soils in March 2017 and 2018 in east part of the Vasyugan mire (Western Siberia, the Ob river basin, the Russian Federation) the authors have analyzed: chemical composition of acid extracts from peats and soils using ICP MS; composition of mineral inclusions in peat and soils using the method of scanning electronic microscopy and XRD-analysis. Concentration of 73 chemical elements was determined and three groups of elements were allocated: 1) with rather steady increase from a surface to bottom soils and/or a strongly pronounced maximum in bottom soils; 2) with well expressed maxima in the top and bottom parts of peat deposits; 3) with other types of distribution. The major factors of spatial changes in chemical composition of peat and soils are mainly natural biogeochemical conditions, water exchange intensity, ratio of the atmospheric and ground water and mineral feed which determine the common availability of water and nutrients for bog vegetation, removal of toxic substances for this vegetation.

### Key words:

Vasyugan mire, peat, soils, chemical composition, mineral composition, change on peat deposition depth.

The research was financially supported by the Russian Government (grant 14.Z50.31.0012).

### REFERENCES

- Rasskazov N.M., Udodov P.A., Nazarov A.D., Emelyanova T.Ya. Bolotnye vody Tomskoy oblasti [Swamp waters]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1975, vol. 297, pp. 102–117.
- Bernatonis V.K., Arkhipov V.S., Zdvizhkov M.A., Preys Yu.I., Tikhomirova N.O. Geokhimiya rasteniy i torfov Bolshogo vasyuganskogo bolota [Geochemistry of plants and peats of the Great Vasyugan bog]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002, pp. 204–215.
- Arbuzov S.I., Arkhipov V.S., Bernatonis V.K., Bobrov V.A., Maslov S.G., Mezhibor A.M., Preis Yu.I., Rikhvanov L.P., Sudyko A.F., Syso A.I. Average content of several elements-admixtures in peats of south-east part of Western-Siberian plate. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 315, no. 1, pp. 44–48. In Rus.
- Arkhipov V.S., Bernatonis V.K. Distribution of calcium and iron in the vertical profile of peat deposits in the taiga zone of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 1, pp. 173–178. In Rus.
- Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kondratieva I.A., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda-poroda. T. 1. Sistema voda-poroda v usloviyakh zony gipergeneza* [Geological evolution and self-organizing of water-rock system. V. 1. Water-rock system in conditions of a zone of active water exchange]. Ed. by B.N. Ryzhenko. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publ. house, 2007. 389 p.
- Savichev O.G., Mazurov A.K. Changes of chemical composition of waters in East Part of the Vasyugan Mire (Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 38–48. In Rus.
- Arbuzov S.I., Maslov S.G., Finkelman R.B., Mezhibor A.M., Ilenok S.S., Blokhin M.G., Peregodina E.V. Modes of occurrence of rare earth elements in peat from Western Siberia. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, no. 10, pp. 1–22. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.10.012> (accessed 12 October 2017).
- Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A. *Bolotnye sistemy Zapadnoy Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie* [Bog of Western Siberia and their conservation value]. Tula, Grif i K' Publ., 2001. 584 p.

9. Pologova N.N., Lapshina E.D. Nakoplenie ugleroda v torfyanykh zalezakh Bolshogo Vasuganskogo bolota [Carbon accumulation in peat bog deposits of the Great Vasyugan]. *Bolshoe Vasuganskoe boloto. Sovremennoe sostoyanie i protsessy razvitiya* [Big Vasyugan bog. Current status and development]. Tomsk, Institute of Atmospheric Optics SB RAS Publ., 2002. pp. 174–179.
10. Minayeva T., Bleuten W., Sirin A., Lapshina E.D. Eurasian Mires of the Southern Taiga Belt: Modern Features and Response to Holocene Palaeoclimate. *Wetlands and Natural Resource Management. Ecological Studies*. Vol. 190. Eds. J.T.A. Verhoeven, B. Beltman, R. Bobbink, D.F. Whigham. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. pp. 315–341.
11. Savichev O.G. Geochemical indicators of bog waters in the taiga zone of Western Siberia. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2015, no. 4, pp. 47–57. In Rus.
12. Savichev O.G. Distribution of Inorganic Pollutants over the Depth of Upper Peat Deposit. *Contemporary Problems of Ecology*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 118–124.
13. Savichev O.G., Mazurov A.K., Guseva N.V., Domarenko V.A., Khvashchevskaya A.A. The forecast of change of macrocomponent composition of wetland waters at extraction of minerals in the Tomsk region. *Geography and natural resources*, 2016, no. 1, pp. 94–102. In Rus.
14. Savichev O.G., Mazurov A.K., Semiletov I.P., Bazanov V.A., Guseva N.V., Khvashchevskaya A.A., Nalivayko N.G. Hydrogeochemical conditions of formation of oligotrophic bog ecosystems. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2016, no. 5, pp. 60–69. In Rus. Available at: <http://dx.doi.org/10.15356/0373-2444-2016-5-60-69> (accessed 03 November 2017).
15. Domarenko V.A., Savichev O.G., Peregudina E.V. Peculiarities of the distribution of chemical elements in the marsh ecosystems of Eastern Vasyuganie. *Razvedka i okhrana nedr*, 2017, no. 8, pp. 50–55. In Rus.
16. Awid-Pascual R., Kamenetsky V.S., Goemann K., Allen N., Noble T.L., Lottermoser B.G., Rodemann T. The evolution of authigenic Zn–Pb–Fe-bearing phases in the Grieves Siding peat, western Tasmania. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2015, no. 170, p. 17. DOI: 10.1007/s00410-015-1167-y.
17. Cabala J., Smieja-Król B., Jablonska M., Chrost L. Mineral components in a peat deposit: looking for signs of early mining and smelting activities in Silesia–Cracow region (Southern Poland). *Environmental Earth Sciences*, 2013, no. 69, pp. 2559–2568. DOI: 10.1007/s12665-012-2080-6.
18. Labrenz M., Druschel G.K., Thomsen-Ebert T., Gilbert B., Welch S.A., Kemner K.M., Logan G.A., Summons R.E., Stasio G., Bond P.L., Lai B., Kelly S.D., Banfield J.F. Formation of sphalerite (ZnS) deposits in natural biofilms of sulfate-reducing bacteria. *Science*, 2000, no. 290, pp. 1744–1747.
19. Shotyk W. Review of the inorganic geochemistry of peats and peatland waters. *Earth-Science Reviews*, 1988, no. 25, pp. 95–176. DOI: 10.1016/0012-8252(88)90067-0.
20. Kamenov G.D., Brenner M., Tucker J.L. Anthropogenic versus natural control on trace element and Sr–Nd–Pb isotope stratigraphy in peat sediments of southeast Florida (USA), 1500 AD to present. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, no. 73, pp. 3549–3567. DOI: 10.1016/j.gca.2009.03.017.
21. Kylander M.E., Martinez-Cortizas A., Bindler R., Greenwood S.L., Mörth C.-M., Rauch S. Potentials and problems of building detailed dust records using peat archives: An example from Store Mosse (the «Great Bog»), Sweden. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, no. 190, pp. 156–174. DOI: 10.1016/j.gca.2016.06.028.
22. López-Buendía A.M., Whateley M.K.G., Bastida J., Urquiola M.M. Origins of mineral matter in peat marsh and peat bog deposits, Spain. *International Journal of Coal Geology*, 2007, vol. 71, pp. 246–262. DOI: 10.1016/j.coal.2006.09.001.
23. Rothwell J.J., Robinson S.G., Evans M.G., Yang J., Allott T.E.H. Heavy metal release by peat erosion in the Peak District, southern Pennines, UK. *Hydrological Processes*, 2005, no. 19, pp. 2973–2989. DOI: 10.1002/hyp.5811.
24. Smieja-Król B., Fialkiewicz-Kozieł B. Quantitative determination of minerals and anthropogenic particles in some Polish peat occurrences using a novel SEM point-counting method. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, no. 186, pp. 2573–2587. DOI: 10.1007/s10661-013-3561-0.
25. Steinmann P., Shotyk W. Geochemistry, mineralogy, and geochemical mass balance on major elements in two peat bog profiles (Jura Mountains, Switzerland). *Chemical Geology*, 1997, no. 138, pp. 25–53. DOI: 10.1016/S0009-2541(96)00171-4.
26. Syrovetsnik K., Puura E., Neretnieks I. Accumulation of heavy metals in Oostriku peat bog, Estonia: Site description, conceptual modelling and geochemical modelling of the source of the metals. *Environmental Geology*, 2004, no. 45, pp. 731–740. DOI: 10.1007/s00254-003-0931-x.
27. Zaccone C., Pabst S., Senesi G.S., Shotyk W., Miano T.M. Comparative evaluation of the mineralogical composition of Sphagnum peat and their corresponding humic acids, and implications for understanding past dust depositions. *Quaternary International*, 2013, no. 306, pp. 80–87. DOI: 10.1016/j.quaint.2013.04.017.
28. Preiss Yu.I., Bobrov V.A., Budashkina V.V., Gavshin V.M. Estimation of streams of mineral substance on properties of peat sediments of the Bakchar mire (a southern taiga zone of the Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 1, pp. 43–47. In Rus.
29. Veretennikova E.E. Lead in the natural peat cores of ridge-hollow complex in the taiga zone of West Siberia. *Ecological Engineering*, 2015, vol. 80, pp. 100–107.
30. *Torfyanyye resursy Tomskoy oblasti. Spravochnik po sostoyaniyu izuchennosti na 01.01.1998* [Peat resources of the Tomsk region. A handbook on the state of knowledge at 01.01.1998]. Novosibirsk, SNIIGGIMS Publ., 1998. 405 p.
31. Savicheva O.G., Inisheva L.I. Biologicheskaya aktivnost torfyanykh bolot [Biological activity of peat bogs]. *Contemporary Problems of Ecology*, 2000, no. 5, pp. 607–614.
32. Inisheva L.I., Dementyeva T.V., Golovatskaya E.A., Porokhina E.V. *Nauchno-issledovatel'skiy poligon «Vasyuganye». Programma nauchnoy ekskursii* [Scientific-research ground «Vasyugane». Program of scientific excursion]. Tomsk, TSNTI Publ., 2003. 88 p.
33. GOST. *Torf. Terminy i opredeleniya* [State Standard 21123–85. Peat. Terms and definitions]. 01.07.1986. Moscow, Izdatelstvo standartov, 1985. 85 p.
34. Lishvan I.I., Bazin E.T., Kosov V.I. *Fizicheskiye protsessy v torfyanykh zalezakh* [Physical processes in peat deposits]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1989. 287 p.
35. Maslov B.S. *Gidrologiya torfyanykh bolot* [Hydrology of peat bogs]. Moscow, Rosselkhozakademiya Publ., 2009. 266 p.
36. Ivanov K.E. *Vodooobmen v bolotnykh landskapes* [Water exchange in mire landscapes]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 280 p.
37. Emelyanova T.Ya., Kramarenko V.V. Kharakteristiki filtratsionnykh svoystv torfov Tomskoy oblasti [Characteristic of filtration properties of peats of Tomsk area]. *Obskoy vestnik*, 2001, no. 1, pp. 36–39.
38. Kramarenko V.V. Kharakteristika torfyanykh gruntov Vasyuganskogo bolota (mezhdurechya Bakchar–Iksha–Shegarka) [Characteristic of peat soils of Vasyugan mire (basin between the Bakchar, Iksha and Shegarka rivers)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2003, vol. 306, no. 6, pp. 28–31. In Rus.
39. *Prirodnye resursy tsentralnoy chasti Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Natural resources of the central part of West Siberian plain]. Ed. by G.V. Dobrovolsky, E.M. Sergeev, A.S. Gerasimova. Moscow, Moscow State University Press, 1977. 211 p.

40. *Melioratsiya i vodnoe khozyaystvo. Vol. 3. Osushenie* [Land improvement and water management. Vol. 3. Drainage]. Ed. by B.S. Maslov. Moscow, Agropromizdat Publ., 1985. 447 p.
41. Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo- i vlagobmena poverkhnosti sushy s atmosferoy* [Modelling of warm and moisture exchange of a land surface with an atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 327 p.
42. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. P. I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282–290.
43. *Posobie po opredeleniyu rasschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Manual in definition of hydrological characteristics]. Ed. by T.S. Schmidt. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1984. 448 p.
44. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
45. Drever J.I. *The geochemistry of natural waters*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, Inc., 1982. 440 p.
46. Timofeev P.P., Bogolyubova L.I. *Geokhimiya organicheskogo veshchestva golotsenovykh otlozheniy v oblastiakh primorskogo torfonakopleniya* [Geochemistry of organic substance of the holocene deposits seashore areas of peat accumulation]. Moscow, Nauka Publ., 1999. 220 p.
47. Syso A.I. *Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoy Sibiri*. Avtoref. Dokt. nauk [Laws of distribution of chemical elements in rocks and soils of Western Siberia. Dr. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2004. 32 p.
48. Savichev O.G., Bernatonis P.V., Bernatonis V.K. Hydrological substantiation of economic development of marshes (by the example of the Kluch river basin, the Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 1, pp. 155–162. In Rus.
49. Ephraim J.H., Allard B. Metal Ion Binding by Humic Substances. *Modelling in Aquatic Chemistry*. Eds. I. Grenthe, I. Puigdomenech. Paris, France, OECD, Nuclear Energy Agency, 1997. pp. 207–244.
50. Robinson B., Bolan N., Mahimairaja S., Clothier B. Solubility, Mobility, and Bioaccumulation of Trace Elements: Abiotic Processes in the Rhizosphere. *Trace elements in the environment: biogeochemistry, biotechnology, and bioremediation*. Eds. M.N.V. Prasad, Ravi Naidu, Kenneth S. Sajwan. New York, USA, Taylor & Francis Group, 2006. pp. 97–110.
51. Motuzova N.V. *Soedineniya mikroelementov v pochvakh. Sistmnaya organizatsiya, ekologicheskoe znachenie, monitoring* [Microelements in soils. System organization, ecological value, monitoring]. Moscow, LIBROCOM Publ., 2013. 168 p.
52. Vodyanitskii Yu.N., Kiseleva N.D., Lopatovskaya O.G., Savichev A.T. Geochemistry of carbonatic/sulphatic soils in the southern Angara region, Russia. *Annals of agrarian science*, 2016, no. 14, pp. 140–151. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aasci.2016.05.016> (accessed 20 August 2018).
53. Naymushina O.S. *Geokhimicheskaya evolyutsiya prirodnykh vod nizhney chasti basseyna reki Tomi*. Avtoreferat Kand. nauk [Geochemical evolution of natural waters of the bottom part of the Tom river basin. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2014. 22 p.
54. Kraynov S.R., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod khozyaystvenno-pitevogo naznacheniya* [Geochemistry of ground waters of economic-drinking assignment]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 237 p.
55. Efremova T.T., Bazhin N.M., Gadzhiyev I.M., Efremov S.P., Makhov G.A. Osobennosti metanogeneza na oligotrofnykh bolotakh Zapadnoy Sibiri i otsenka faktorov sredey v svyazi s korrektnoy ekstrapolyatsiyey potokov CH<sub>4</sub> na bolshie territorii [Features of formation of methane on oligotrophic bogs of Western Siberia and estimation of environmental factors in relation to the correct extrapolation of CH<sub>4</sub> streams on the big territories]. *Contemporary Problems of Ecology*, 1998, no. 6, pp. 563–570.
56. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod: teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.
57. Savenko A.V. O vzaimosvyazannosti vnutrivodoemnykh tsiklov fosfora i zheleza [On interconnectedness of intrabasin cycles of phosphorus and iron]. *Water resources*, 1998, vol. 25, no. 3, pp. 330–334.
58. Shotykh W. Peat bog archives of atmospheric metal deposition: geochemical evaluation of peat profiles, natural variations in metal concentration, and metal enrichment factors. *Environmental Reviews*, 1996, vol. 4, pp. 149–183.
59. Shatilov A.Yu. *Veshchestvennyy sostav i geokhimicheskaya kharakteristika pylevykh atmosferykh vypadeniy na territorii Ob'skogo basseyna*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Material structure and geochemical characteristic of atmospheric losses in the Ob river basin. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2001. 22 p.
60. Rikhvanov L.P., Kropanin S.S., Babenko S.A., Solovyev A.I., Sovetov V.M., Usova T.Yu., Polyakova M.A. *Tsirkon-ilmenitovye rossypnye mestorozhdeniya kak potentsialnyy istochnik razvitiya Zapadno-Sibirskogo regiona* [Zircon-ilmenite placer mines as a potential source of West Siberian region exploration]. Kemerovo, Sars Publ., 2001. 214 p.
61. Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A. *Ekogeokhimiya pochv ravninykh landshaftov yuga Zapadnoy Sibiri* [Ecogeochemistry of soils of flat landscapes in the south of Western Siberia]. *Obskoy vestnik*, 1999, no. 3–4, pp. 82–90.
62. Shaykhiyev I.R., Rikhvanov L.P. Ecological and geochemical research of natural environment in Bakchar iron-ore deposit area (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2015, vol. 326, no. 5, pp. 62–78. In Rus.
63. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Bases of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
64. Luyen V.L., Savichev O.G., Domarenko V.A., Tin Q.D. Improved method for hydrochemical exploration of mineral resources. *Vietnam Journal of Earth Sciences*, 2017, vol. 39, no. 2, pp. 167–180. DOI: 10.15625/0866-7187/39/2/9703.

Received: 30 August 2018.

#### Information about the authors

**Oleg G. Savichev**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Aleksey K. Mazurov**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Maxim A. Rudmin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Albina A. Hvashchevskaya**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Aigerim B. Dauletova**, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.31

## ВЛИЯНИЕ ВНУТРИСКВАЖИННОГО КОМПЕНСАТОРА НА ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ

Копырин Владимир Анатольевич<sup>1</sup>,  
kopyrinva@gmail.com

Смирнов Олег Владимирович<sup>1</sup>,  
oleg\_smirnov\_1940@mail.ru

Портнягин Алексей Леонидович<sup>1</sup>,  
pal1979@mail.ru

Хамитов Рустам Нуриманович<sup>2</sup>,  
apple\_27@mail.ru

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

<sup>2</sup> Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью определения требуемого напряжения на выходе питающего трансформатора с учетом компенсации реактивной мощности внутри скважины, с целью предотвращения аварийных ситуаций в процессе эксплуатации установок электроцентробежных насосов.

**Цель исследования:** оценить изменение величины падения напряжения в токопроводящих элементах электротехнического комплекса установки электроцентробежного насоса для добычи нефти при использовании внутрискважинного компенсатора реактивной мощности.

**Объект исследования:** электротехнический комплекс установок электроцентробежных насосов для добычи нефти.

**Методы.** При разработке математической модели электротехнического комплекса погружной установки для добычи нефти использованы положения теоретических основ электротехники, корректные допущения при составлении математических моделей и компьютерное моделирование в программном пакете символьной математики Wolfram Mathematica.

**Результаты.** Разработана схема замещения и математическая модель электротехнического комплекса установки электроцентробежных насосов с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности. С помощью качественной векторной диаграммы напряжений и токов в ветвях и узлах схемы замещения показано распределение величин падений напряжений на элементах комплекса. Анализ векторной диаграммы показал, что внутрискважинный компенсатор уменьшает продольную и поперечную составляющие падения напряжения, что положительно влияет на режим работы установки для добычи нефти. Получены поверхности требуемого напряжения на выходе питающего трансформатора в зависимости от мощности погружного электродвигателя для различных длин и сечений кабельной линии. Установлено, что использование внутрискважинного компенсатора позволяет уменьшить падение напряжения в токопроводящих элементах электротехнического комплекса установки для добычи нефти до 50 В.

### Ключевые слова:

Внутрискважинный компенсатор, напряжение отпайки трансформатора, падение напряжения, реактивная мощность, схема замещения.

### Введение

Повышение энергетической эффективности производства является первостепенной задачей, стоящей перед научно-техническим сообществом, решение которой способствует повышению энергетической безопасности Российской Федерации. В настоящее время снижение доли потерь от суммарной потребляемой энергии достигается модернизацией существующего оборудования с учетом специфических особенностей условий эксплуатации, внедрением новых более эффективных технологических решений, а также внедрением организационных мероприятий.

В России действующий эксплуатационный фонд нефтяных скважин составляет порядка 135 тыс. единиц, из которых свыше 60 % оборудованы установками электроцентробежных насо-

сов (УЭЦН) [1–3] и их доля продолжает увеличиваться.

Известно, что коэффициент полезного действия УЭЦН не превышает 30 % [4, 5]. Основная доля потерь энергии до 43 % при эксплуатации установок электроцентробежных насосов приходится на электротехнический комплекс (ЭТК) для добычи нефти. В связи с этим актуальными становятся вопросы повышения энергетической эффективности и обеспечения энергосбережения электротехнических комплексов погружных установок для добычи нефти.

Вопросами компенсации реактивной мощности в электроэнергетических системах с целью регулирования напряжения, повышения качества электроэнергии, снижения потерь электроэнергии занимались многие отечественные и зарубежные

ученые: Б.Н. Абрамович [6, 7], И.В. Жежеленко [8], Ю.С. Железко [9], Н. Akagi [10], L. Czarnecki [11, 12], D. Sharon [13, 14] и другие. В указанных работах авторами предложены методики определения реактивной мощности, описаны и предложены устройства компенсации, способы управления данными устройствами, доказана эффективность их применения.

Для повышения эффективности использования электроэнергии ЭТК УЭЦН в работах [15–17] предложено применять внутрискважинные компенсаторы реактивной мощности (ВКРМ), которые можно разделить на две группы: регулируемые и нерегулируемые. Авторами установлено, что внедрение технологии внутрискважинной компенсации реактивной мощности на нефтедобывающих объектах позволяет повысить энергетическую эффективность добычи нефти до 15,8 %. Суть технологии заключается в том, что компенсирующее устройство устанавливается непосредственно в скважине и подключается параллельно зажимам погружного электродвигателя. Повышение энергетической эффективности достигается за счет уменьшения потерь активной мощности в токопроводящих элементах электротехнического комплекса вследствие снижения потребляемого тока.

Тем не менее, если при эксплуатации нефтяных скважин, оборудованных УЭЦН, не учитывать тот факт, что использование внутрискважинных компенсаторов приводит к снижению падения напряжения в узлах электротехнического комплекса, за счет уменьшения потребляемого тока [18–20], может произойти случай, когда напряжение на погружном электродвигателе и самом компенсаторе будет выше заданного значения при неправильном выборе отпайки питающего трансформатора. Это может привести к снижению ресурса погружного электрооборудования и нарушению технологии

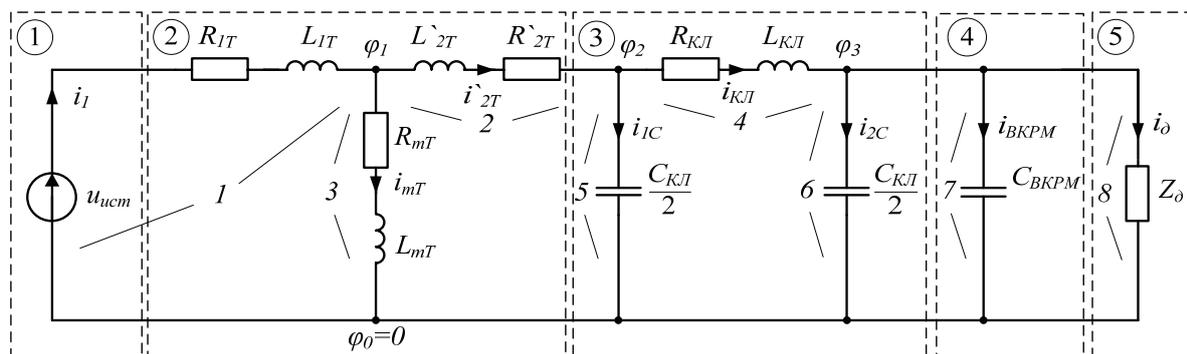
добычи. Для батарей конденсаторов, чувствительных к повышению напряжения [18], в некоторых случаях допускается превышение уровня напряжения на 10 % выше номинального продолжительностью не более 8 часов.

В настоящее время поддержание напряжения близкого к номинальному на погружном электродвигателе достигается изменением отпайки питающего трансформатора или изменением напряжения на выходе станции управления, оборудованной преобразователем частоты. Существующие технические регламенты большинства нефтедобывающих компании по ремонту, обслуживанию и выводу на режим скважин с УЭЦН составлены без учета компенсации реактивной мощности внутри скважины. Поэтому данная статья имеет практический интерес для инженеров и энергетиков нефтедобывающих и сервисных компаний при корректировке технических регламентов в части определения напряжения на выходе питающего трансформатора.

#### Объект и методы исследования

Для оценки влияния внутрискважинного компенсатора на величину падения напряжения на элементах электротехнического комплекса УЭЦН, который включает: источник питания, питающий трансформатор, кабельную линию (КЛ), погружной электродвигатель и внутрискважинный компенсатор реактивной мощности, разработана и приведена на рис. 1 схема замещения комплекса. Согласно рекомендациям положений теоретических основ электротехники для симметричных трехфазных систем, к которым относится ЭТК УЭЦН, моделирование производится для одной фазы.

Схема замещения ЭТК УЭЦН (рис. 1) по методу узловых потенциалов описывается системой матричных уравнений:



**Рис. 1.** Схема замещения ЭТК УЭЦН: 1 – источник питания; 2 – питающий трансформатор; 3 – кабельная линия; 4 – внутрискважинный компенсатор реактивной мощности; 5 – погружной асинхронный электродвигатель;  $u_{ист}$ ,  $i_{ист}$  – напряжение и ток источника питания;  $Z$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $C$  – полное и активное сопротивления, индуктивность и емкость соответствующих элементов;  $\varphi$ ,  $i$  – потенциалы узлов и токи ветвей

**Fig. 1.** Equivalent circuit of the ETC ESP: 1 is the power source; 2 is the power supply transformer; 3 is the cable; 4 is the downhole reactive power compensator; 5 is the submersible induction motor;  $u_{sys}$ ,  $i_{sys}$  is the voltage and current power source;  $Z$ ,  $R$ ,  $L$ ,  $C$  is the full and active resistance, inductance, and capacitance of the respective elements;  $\varphi$ ,  $i$  are the the nodes' potentials and the branch currents

$$\begin{bmatrix} (Y_1 + Y_2 + Y_3)\varphi_1 - Y_2\varphi_2 \\ -Y_2\varphi_1 + (Y_2 + Y_4 + Y_5)\varphi_2 - Y_4\varphi_3 \\ -Y_4\varphi_2 + (Y_4 + Y_6 + Y_7 + Y_8)\varphi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{\text{ист}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $Y$  – комплексные проводимости соответствующих ветвей.

Напряжения и токи соответствующих узлов и ветвей схемы замещения определяются следующим образом:

$$\dot{U}_i = \begin{bmatrix} -\varphi_1 \\ \varphi_1 - \varphi_2 \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 - \varphi_3 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \\ \varphi_3 \\ \varphi_3 \end{bmatrix}, \quad \dot{I}_i = \begin{bmatrix} Y_1(\dot{U}_{\text{ист}} - \varphi_1) \\ Y_2(\varphi_1 - \varphi_2) \\ Y_3\varphi_1 \\ Y_4(\varphi_2 - \varphi_3) \\ Y_5\varphi_2 \\ Y_6\varphi_3 \\ Y_7\varphi_3 \\ Y_8\varphi_3 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $\dot{U}_i, \dot{I}_i$  – напряжение и ток на  $i$  узле, ветви соответственно,  $i=1...8$ .

Для качественного анализа влияния внутрискважинного компенсатора на электрические параметры ЭТК УЭЦН построим в соответствии с выражениями (1) и (2) векторную диаграмму напряжений и токов (рис. 2) в узлах и ветвях схемы. Масштабы векторов напряжений и токов на векторной диаграмме могут не совпадать. Для удобства построения за начальный вектор принято напряжение на погружном электродвигателе.

На диаграмме видно, что ток  $\dot{I}_{\text{КЛ}}$ , протекающий по кабельной линии, представляет собой геометрическую сумму токов погружного электродвигателя  $\dot{I}_d$ , внутрискважинного компенсатора  $\dot{I}_{\text{ВКРМ}}$  и тока проводимости в конце кабельной линии  $\dot{I}_{2C}$ .

Для определения падения напряжения на кабельной линии  $\Delta\dot{U}_{32}$  откладываем от конца вектора напряжения на погружном электродвигателе  $\dot{U}_d$  параллельно вектору тока  $\dot{I}_{\text{КЛ}}$  продольную составляющую падения напряжения на активном сопротивлении  $\Delta\dot{U}_{\text{КЛ}}$ . Под углом  $90^\circ$  к вектору  $\Delta\dot{U}_{\text{КЛ}}$  в

сторону опережения откладываем поперечную составляющую падения напряжения на реактивном сопротивлении  $\delta\dot{U}_{\text{КЛ}}$ . Геометрическая сумма векторов  $\Delta\dot{U}_{\text{КЛ}}$  и  $\delta\dot{U}_{\text{КЛ}}$  равна падению напряжения в кабельной линии  $\Delta\dot{U}_{32}$ .

Емкостной ток проводимости в конце КЛ  $\dot{I}_{2C}$  и емкостной ток внутрискважинного компенсатора  $\dot{I}_{\text{ВКРМ}}$ , протекая по линии совместно с током погружного электродвигателя  $\dot{I}_d$ , компенсируют соответствующую величину индуктивной составляющей погружного электродвигателя.

Чтобы определить ток  $\dot{I}_1$ , потребляемый из сети, необходимо сложить векторы тока  $\dot{I}_{\text{мТ}}$  ветви намагничивания и тока  $\dot{I}_{2T}$ , протекающего по вторичной обмотке трансформатора. Ток  $\dot{I}_{2T}$  представляет собой геометрическую сумму вектора тока кабельной линии  $\dot{I}_{\text{КЛ}}$  и тока проводимости в начале кабельной линии  $\dot{I}_{1C}$ .

Для определения падения напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $\Delta\dot{U}_{21}$  от конца вектора  $\Delta\dot{U}_{32}$  параллельно вектору тока  $\dot{I}_{2T}$  откладываем продольную составляющую падения напряжения на активном сопротивлении  $\Delta\dot{U}_{2T}$ . Под углом  $90^\circ$  к вектору  $\Delta\dot{U}_{2T}$  в сторону опережения откладываем поперечную составляющую падения напряжения на реактивном сопротивлении  $\delta\dot{U}_{2T}$ . Геометрическая сумма векторов  $\Delta\dot{U}_{2T}$  и  $\delta\dot{U}_{2T}$  равна падению напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $\Delta\dot{U}_{21}$ .

Для определения падения напряжения на первичной обмотке трансформатора  $\Delta\dot{U}_{1T}$  вектор падения напряжения на активном сопротивлении следует откладывать параллельно вектору тока  $\dot{I}_1$ , аналогично вторичной обмотке.

Геометрическая сумма векторов  $\dot{U}_d, \Delta\dot{U}_{32}, \Delta\dot{U}_{21}$  и  $\Delta\dot{U}_{1T}$  составляет напряжение источника питания.

Из диаграммы следует, что внутрискважинный компенсатор положительно влияет на режим работы ЭТК УЭЦН. Увеличение поперечной емкостной составляющей в конце кабельной линии приводит к снижению токов в кабельной линии и обмотках питающего трансформатора и как следствие уменьшению падения напряжения в элементах ком-

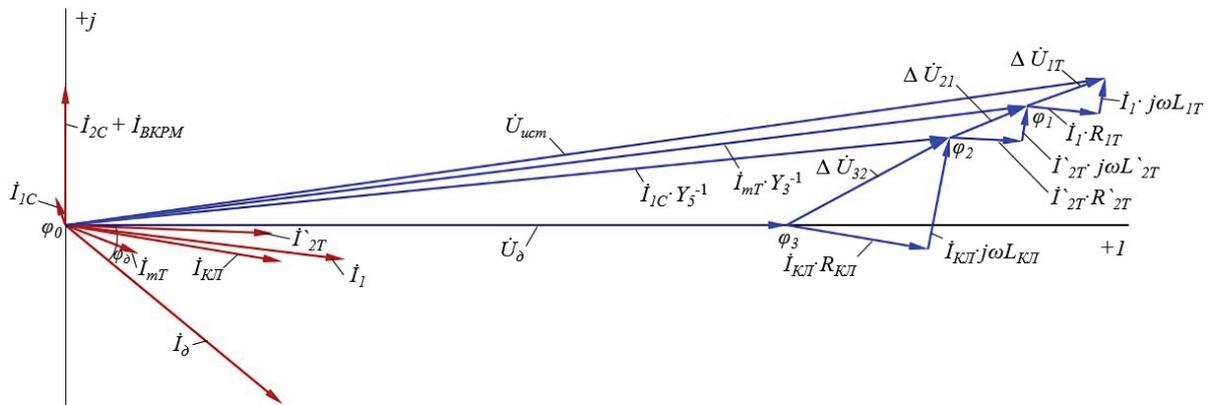


Рис. 2. Качественная векторная диаграмма ЭТК УЭЦН

Fig. 2. Qualitative vector diagram ETC ESP

плекса. Тем не менее снижение падения напряжения приводит к повышению напряжения на погружном электродвигателе и внутрискважинном компенсаторе. Это может привести к перекомпенсации и нивелированию положительного эффекта. Поэтому напряжение отпайки трансформатора следует задавать с учетом внутрискважинного компенсатора.

Требуемое напряжение на выходе питающего трансформатора, согласно схеме замещения (рис. 1) и векторной диаграмме (рис. 2), определяется по выражению:

$$U_{\text{ТМПН}} = \left| \dot{U}_{\text{д.ном}} + \Delta \dot{U}_{\text{Т}} + \Delta \dot{U}_{\text{КЛ}} \right|, \quad (3)$$

где  $\dot{U}_{\text{д.ном}}$  – комплексное номинальное напряжение погружного электродвигателя;  $\Delta \dot{U}_{\text{Т}}$  – падение напряжения в обмотках трансформатора;  $\Delta \dot{U}_{\text{КЛ}}$  – падение напряжения в кабельной линии.

Падение напряжения в обмотках трансформатора без учета ветви намагничивания, ввиду его незначительного влияния, определяется по выражению:

$$\Delta \dot{U}_{\text{Т}} = \frac{\dot{S}}{U_{\text{ТМПН}}} (R'_{\text{экт}} + jx'_{\text{экт}}) = \dot{I}_1 (R'_{\text{экт}} + jx'_{\text{экт}}), \quad (4)$$

где  $\dot{S}$  – комплексная полная мощность, потребляемая УЭЦН;  $U_{\text{ТМПН}}$  – напряжение на выходе питающего трансформатора;  $\dot{I}_1$  – ток сети,  $\dot{I}_1 = \dot{I}'_{2\text{T}}$ ;  $R'_{\text{экт}}$ ,  $X'_{\text{экт}}$  – приведенные эквивалентные активное и реактивное сопротивления питающего трансформатора.

Приведенные эквивалентные активное и реактивное сопротивления питающего трансформатора определяются по известным выражениям:

$$R'_{\text{экт}} = R_{1\text{T}} + R_{2\text{T}} = \frac{\Delta P_{\text{к}} U_{\text{вн.ном}}^2 \cdot 10^3}{S_{\text{вн.ном}}^2};$$

$$x'_{\text{экт}} = x_{1\text{T}} + x_{2\text{T}} = \frac{u_{\text{к}} \% U_{\text{вн.ном}}^2 \cdot 10^3}{100 S_{\text{ном}}},$$

где  $\Delta P_{\text{к}}$  – потери короткого замыкания, кВт;  $U_{\text{вн.ном}}$  – номинальное напряжение высшей ступени трансформатора, кВ;  $S_{\text{ном}}$  – полная мощность трансформатора, кВА;  $u_{\text{к}} \%$  – напряжение короткого замыкания, %.

Падение напряжения в кабельной линии определяется по выражению:

$$\Delta \dot{U}_{\text{КЛ}} = \dot{I}_1 (R_{\text{КЛ}} + jx_{\text{КЛ}}), \quad (5)$$

где  $R_{\text{КЛ}}$ ,  $X_{\text{КЛ}}$  – активное и реактивное сопротивления кабельной линии, которые определяются по выражениям:

$$R_{\text{КЛ}} = 10^3 \rho \left( \frac{l_1}{S_1} + \frac{l_2}{S_2} \right) [1 + 0,004(T - 20)];$$

$$x_{\text{КЛ}} = x_0 (l_1 + l_2),$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $l_1$ ,  $l_2$  – длина основного кабеля и кабеля-удлинителя соответственно, км;  $S_1$ ,  $S_2$  – сечение токопроводящей жилы основного кабеля и кабеля-уд-

линителя соответственно, мм<sup>2</sup>;  $T$  – температура токопроводящих жил кабелей, °С;  $x_0$  – погонное индуктивное сопротивление кабельной линии, Ом/км.

В настоящее время с увеличением доли трудноизвлекаемых запасов углеводородов длина кабельной линии нередко составляет 2000 м, а в некоторых случаях достигает 3500 м. Температуры пластовых жидкостей на таких глубинах варьируются от 40 до 120 °С и могут повышаться до 150 °С [21, 22]. В связи с этим расчетная температура для определения активного сопротивления токопроводящих жил кабельной линии принимается 70 °С.

В качестве питающего кабеля, как правило, используется кабель марки КППП или КППК плоского или круглого сечения с изоляцией из фторопласта. Если погонная емкость данных кабелей составляет 0,1 мкФ/км, а емкостное сопротивление при частоте 50 Гц равно 31,847 кОм/км и на порядок выше активного и индуктивного сопротивления, то ее можно исключить из схемы замещения (рис. 1) и не учитывать при расчетах. Принятое допущение не сильно повлияет на точность определения падения напряжения в элементах ЭТК УЭЦН.

Тогда ток сети, с учетом принятых допущений, согласно I-му закону Кирхгофа определяется по выражению:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{\text{ВКРМ}} + \dot{I}_{\text{д}}. \quad (6)$$

Согласно схеме замещения (рис. 1), напряжение на внутрискважинном компенсаторе равно напряжению на погружном электродвигателе. Токи, потребляемые внутрискважинным компенсатором и погружным электродвигателем, определяются по выражениям:

$$\dot{I}_{\text{ВКРМ}} = \frac{jQ_{\text{ВКРМ}}}{\sqrt{3}\dot{U}_{\text{д.ном}}}; \quad (7)$$

$$\dot{I}_{\text{д}} = \frac{\tilde{S}_{\text{д.ном}}}{\sqrt{3}\dot{U}_{\text{д.ном}}} = \frac{P_{\text{д.ном}} - jQ_{\text{д.ном}}}{\sqrt{3}\dot{U}_{\text{д.ном}}}, \quad (8)$$

где  $Q_{\text{ВКРМ}}$  – реактивная мощность внутрискважинного компенсатора, вар;  $\tilde{S}_{\text{д.ном}}$ ,  $P_{\text{д.ном}}$ ,  $Q_{\text{д.ном}}$  – комплексно-сопряженная полная, активная и реактивная мощности, потребляемые погружным электродвигателем соответственно, ВА, Вт, вар.

Преобразуем выражение (3) согласно (4)–(8):

$$U_{\text{ТМПН}} = \left| \dot{U}_{\text{д.ном}} + \left( \frac{P_{\text{д.ном}}}{\sqrt{3}\dot{U}_{\text{д.ном}}} + \frac{jQ_{\text{ВКРМ}} - jQ_{\text{д.ном}}}{\sqrt{3}\dot{U}_{\text{д.ном}}} \right) \times \right| \times (Z'_{\text{экт}} + Z_{\text{КЛ}})$$

где  $Z'_{\text{экт}}$ ,  $Z_{\text{КЛ}}$  – комплексные полные сопротивления питающего трансформатора и кабельной линии соответственно.

Полученное выражение позволяет определить требуемое напряжение на выходе питающего трансформатора с учетом внутрискважинного компенсатора реактивной мощности и подобрать отпайку трансформатора.

### Результаты моделирования

Для оценки влияния внутрискважинного компенсатора на величину падения напряжения в элементах электротехнического комплекса рассмотрим УЭЦН, оснащенную трансформатором марки ТМПН 400/3. Расчетное полное эквивалентное сопротивление трансформатора равно [16]:

$$Z'_{акТ} = 0,23 + j0,859 \text{ Ом.}$$

Диапазон изменения мощностей погружного электродвигателя принимается от 100 до 250 кВт. Коэффициент мощности погружных электродвигателей принимается 0,735 [16]. Требуемый уровень коэффициента мощности сети в точке подключения внутрискважинного компенсатора принимается равным 0,95.

С помощью специализированного программного пакета символьной математики Wolfram Mathematica получены и приведены на рис. 3 результаты расчета требуемого уровня напряжения отпайки трансформатора в зависимости от мощности погружного электродвигателя, длин и сечений кабельной линии.

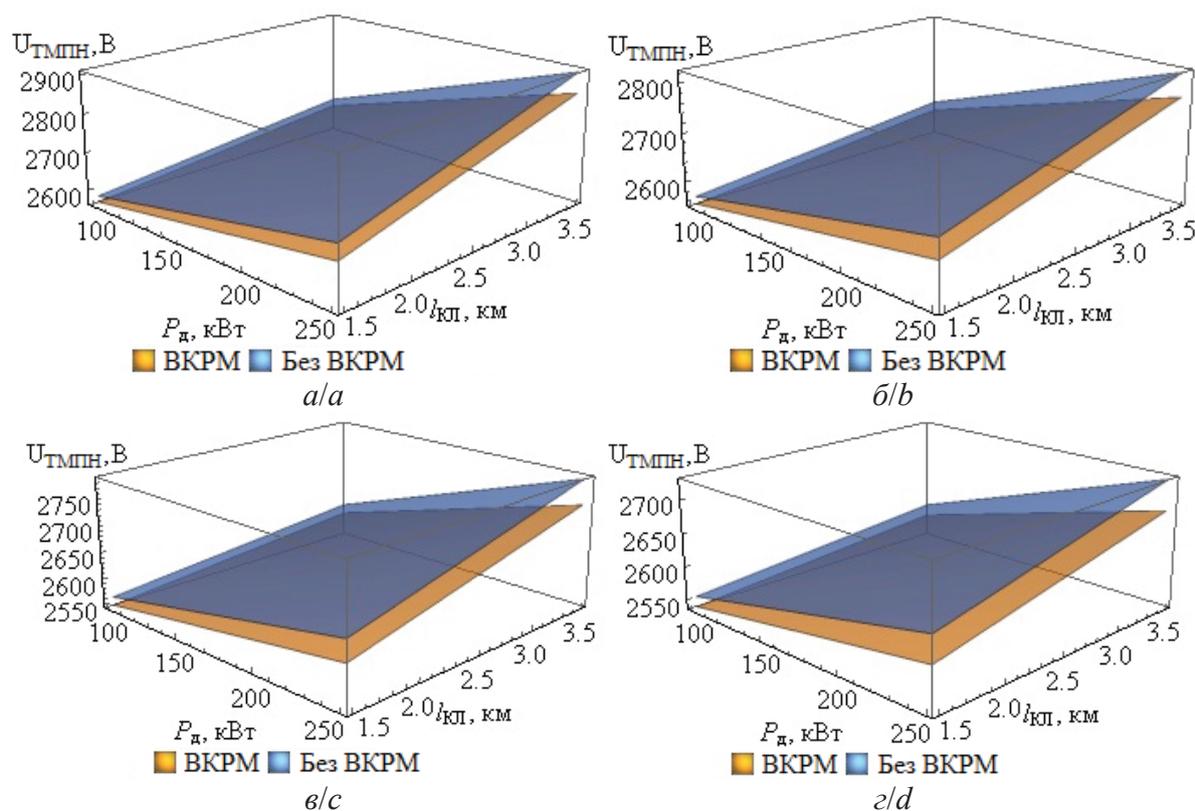
Анализ поверхностей (рис. 3) показал, что использование внутрискважинного компенсатора приводит к снижению требуемого уровня напряжения отпайки питающего трансформатора во всех диапазонах мощностей погружных электро-

двигателей, длин и сечений кабельной линии. Например, для УЭЦН, оснащенной погружным электродвигателем мощностью 200 кВт, кабельной линией длиной 1500 м, сечением токопроводящих жил 16 мм<sup>2</sup>, требуемое напряжение отпайки трансформатора до компенсации реактивной мощности внутри скважины составило 2667 В, после компенсации – 2635 В.

Таким образом, использование внутрискважинных компенсаторов в составе установок электроцентробежных насосов на нефтедобывающих объектах приводит к снижению падения напряжения, что положительно сказывается на режиме работы установки.

### Заключение

1. Получена схема замещения и математическая модель электротехнического комплекса УЭЦН. На основании разработанной схемы замещения и математической модели построена качественная векторная диаграмма ЭТК УЭЦН, анализ которой показал, что использование внутрискважинного компенсатора реактивной мощности приводит к снижению падения напряжения в элементах комплекса.
2. Получены поверхности требуемого уровня напряжения отпайки трансформатора до и после



**Рис. 3.** Поверхности требуемого уровня напряжения отпайки трансформатора до и после компенсации реактивной мощности внутри скважины при  $U_{д,ном}=2500$  В: а)  $S_{КЛ}=16$  мм<sup>2</sup>; б)  $S_{КЛ}=21,15$  мм<sup>2</sup>; в)  $S_{КЛ}=25$  мм<sup>2</sup>; г)  $S_{КЛ}=35$  мм<sup>2</sup>

**Fig. 3.** Surface of the required voltage level of the transformer before and after compensation of reactive power inside the well at  $U_{д,ном}=2500$  V: а)  $S_{КЛ}=16$  мм<sup>2</sup>; б)  $S_{КЛ}=21,15$  мм<sup>2</sup>; в)  $S_{КЛ}=25$  мм<sup>2</sup>; г)  $S_{КЛ}=35$  мм<sup>2</sup>

компенсации реактивной мощности внутри скважины. Установлено, что использование внутрискважинных компенсаторов позволяет уменьшить падение напряжения в элементах электротехнического комплекса УЭЦН до 50 В.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вопросы энергоэффективности установок электроприводных центробежных насосов / В.Н. Ивановский, А.А. Сабилов, А.В. Деговцов, Ю.А. Донской, А.В. Булат, А.С. Зуев, С.Б. Якимов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 4. – С. 25–30.
2. 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.
3. Букреев В.Г., Сипайлова Н.Ю., Сипайлов В.А. Стратегия управления электротехническим комплексом механизированной добычи нефти на основе экономического критерия // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 75–84.
4. Невоструев В.А. Комплексный подход к энергоэффективности при добыче нефти УЭЦН // Инженерная практика. – 2017. – № 8. – С. 28–32.
5. Якимов С.Б., Каверин М.Н., Тарасов В.П. О новых перспективах применения ПЭД с повышенным напряжением питания для снижения капитальных и операционных затрат // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2015. – № 4. – С. 34–38.
6. Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Зимин Р.Ю. Оценка эффективности гибридных систем коррекции формы кривых тока и напряжения в электрических сетях с распределенной генерацией // Промышленная энергетика. – 2015. – № 8. – С. 49–53.
7. Abramovich B.N., Sychev Y.A. The control algorithm for active and hybrid correction systems of voltage and current waveforms // IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. – Omsk, Russia, 15–17 November 2016. Article number: 7818962. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818962.
8. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252 с.
9. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
10. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. 2 ed. – New Jersey: Wiley, IEEE Press, 2007. – 379 p.
11. Czarnecki L.S., Haley P.M. Unbalanced Power in Four-Wire Systems and its Reactive Compensation // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2015. – V. 30. – № 1. – P. 53–63. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2314599.
12. Czarnecki L.S., Bhattarai P.D. A Method of Calculating LC Parameters of Balancing Compensators for AC Arc Furnaces // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2017. – V. 32. – Iss. 2. – P. 688–695. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2536681.
13. Sharon D. A Power factor definitions and power transfer quality in nonsinusoidal situations // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1996. – V. 45. – Iss. 3. – P. 728–733. DOI: 10.1109/19.494589.
14. Sharon D. Reactive-power definitions and power-factor improvement in nonlinear systems // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – 1973. – V. 120. – Iss. 6. – P. 704–706. DOI: 10.1049/piee.1973.0155.
15. Копырин В.А., Смирнов О.В. Оптимизация режимов потребления реактивной мощности установками электроцентробежных насосов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2018. – № 2. – С. 450–458.
16. Копырин В.А., Смирнов О.В., Портнягин А.Л. Оценка энергетической эффективности использования внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности // Омский научный вестник. – 2018. – № 2(158). – С. 78–83. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-78-83.
17. Смирнов О.В., Копырин В.А. К вопросу об использовании внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности // Известия вузов. Нефть и газ. – 2015. – № 2. – С. 68–70.
18. Хамитов Р.Н., Охотникова А.А., Семеров Е.И. Причины выхода из строя силовых конденсаторов устройств компенсации реактивной мощности // Россия молодая: передовые технологии – в промышленности. – 2015. – № 1. – С. 278–282.
19. Кубарьков Ю.П., Голубева К.А., Макаров Я.В. Выбор мощности компенсирующих устройств для оптимизации уровней потерь в электрической сети // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: технические науки. – 2016. – № 4(52). – С. 77–82.
20. Power loss reduction of 11 kV feeder using capacitor banks to distribution transformers – a case study / V. Mishra, M.P. Sharma, B. Vyas, S.R. Ola // 2016 IEEE 1<sup>st</sup> International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853164.
21. Feasibility study of geothermal heat extraction from abandoned oil wells using a U-tube heat exchanger / S. Gharibi, E. Morteza-zadeh, S.J. Hashemi Aghcheh Badi, V. Ali // Energy. – 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.04.003.
22. Struchkov I.A., Rogachev M.K. The challenges of waxy oil production in a Russian oil field and laboratory investigations // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.082.

Поступила 06.09.2018 г.

#### Информация об авторах

**Копырин В.А.**, специалист отдела развития научных инициатив Тюменского индустриального университета.

**Смирнов О.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

**Портнягин А.Л.**, кандидат технических наук, директор Института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.

**Хамитов Р.Н.**, доктор технических наук, профессор кафедры электрической техники Омского государственного технического университета.

UDC 621.31

## INFLUENCE OF DOWNHOLE COMPENSATOR ON VOLTAGE DROP IN ELEMENTS OF A PRODUCTION WELL ELECTRICAL SYSTEM

**Vladimir A. Kopyrin**<sup>1</sup>,  
kopyrinva@gmail.com

**Oleg V. Smirnov**<sup>1</sup>,  
oleg\_smirnov\_1940@mail.ru

**Alexey L. Portnyagin**<sup>1</sup>,  
pal1979@mail.ru

**Rustam N. Khamitov**<sup>2</sup>,  
apple\_27@mail.ru

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

<sup>2</sup> Omsk State Technical University,  
11, Mira Avenue, Omsk, 644050, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to define the required voltage level of the supply transformer with regard to the downhole reactive power compensator, in order to prevent accidents in operation of electric centrifugal pumps' plants.

**The aim** of the research is to assess the change of voltage drop value in electrotechnical complex conductive elements of the electric center-pump plants for oil production using a downhole reactive power compensator.

**The research object** is the electrotechnical complex of electric center-pump plants for oil production.

**Methods.** Thesis of electrical engineering theoretical foundations, correct assumptions in preparation of mathematical models and computer simulation in the software package of symbolic mathematics Wolfram Mathematica were used when developing the mathematical model of the electrotechnical complex of submersible plant for oil production.

**Results.** The authors have developed the equivalent circuit and mathematical model of electrotechnical complex plant of electric center-pump with a downhole reactive power compensator. The distribution of voltage drop values in the complex elements is shown using the high-quality vector diagram of voltage and current in the branches and nodes of the equivalent circuit. The analysis of the vector diagram showed that the in-hole compensator reduces the longitudinal and transverse components of the voltage drop, which positively affects the mode of operation of the oil production plant. The surface of the required voltage at the output of the supply transformer is obtained depending on submersible electric motor power value for different lengths and sections of the cable line. It was found that the use of the downhole compensator makes it possible to reduce the voltage drop in the current-conducting elements of the electrical engineering complex of the oil production plant to 50 V.

### Key words:

Downhole compensator, transformer soldering voltage, voltage drop, reactive power, circuit of substitution.

### REFERENCES

- Ivanovskiy V.N., Sabirov A.A., Dugowson A.V., Donskoy Yu.A., Bulat A.V., Zuev A.S., Yakimov S.B. Energy efficiency installations of electric centrifugal pumps. *Equipment and technologies for oil and gas industry*, 2016, no. 4, pp. 25–30. In Rus.
- 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.
- Bukreev V.G., Sipaylova N.Yu., Sipailov V.A. Control strategy in accordance with economical criterion for electrotechnical installation of mechanized oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 75–84. In Rus.
- Nevostruev V.A. Operation's experience of energy-efficient ESP «Novomet». *Engineering practice*, 2017, no. 8, pp. 28–32. In Rus.
- Yakimov S.B., Kaverin M.N., Tarasov V.P. About new prospects of the SEM application with the increased supply voltage for reduction of capital and operational expenses. *Equipment and technologies for oil and gas complex*, 2015, no. 4, pp. 34–38. In Rus.
- Abramovich B.N., Sychev Y.A., Zimin R.Yu. Estimation of the efficiency of hybrid systems for correcting the shape of current and voltage curves in distributed distribution networks. *Prom energy*, 2015, no 8, pp. 49–53. In Rus.
- Abramovich B.N., Sychev Y.A. The control algorithm for active and hybrid correction systems of voltage and current waveforms. *IEEE Conference 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. Omsk, Russia, 15–17 November 2016. Article number: 7818962. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7818962.
- Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L. *Pokazateli kachestva elektroenerгии i ikh control na promyshlennykh predpriyatiyakh* [Indicators of power quality and their control in industrial enterprises]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2000. 252 p.
- Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenerгии. Reaktivnaya moshchnost. Kachestvo elektroenerгии: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Loss of electricity. Reactive power. Quality of electricity: a guide for practical calculations]. Moscow, ENAS Publ., 2009. 456 p.
- Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. New Jersey, Wiley, IEEE Press, 2007. 379 p.
- Czarnecki L.S., Haley P.M. Unbalanced Power in Four-Wire Systems and Its Reactive Compensation. *IEEE Transactions on*

- Power Delivery*, 2015, vol. 30, no 1, pp. 53–63. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2314599.
12. Czarnecki L.S., Bhattarai P.D. A Method of Calculating LC Parameters of Balancing Compensators for AC Arc Furnaces. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, vol. 32, Iss. 2, pp. 688–695. DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2536681.
  13. Sharon D. A Power factor definitions and power transfer quality in nonsinusoidal situations. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1996, vol. 45, Iss. 3, pp. 728–733. DOI: 10.1109/19.494589.
  14. Sharon D. Reactive-power definitions and power-factor improvement in nonlinear systems. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1973, vol. 120, Iss. 6, pp. 704–706. DOI: 10.1049/piee.1973.0155.
  15. Kopyrin V.A., Smirnov O.V. Optimization of reactive power consumption regimes by the electric centrifugal pumps installation. *Bulletin of the Tula State University. Technical science*, 2018, no. 2, pp. 450–458. In Rus.
  16. Kopyrin V.A., Smirnov O.V., Portnyagin A.L. Estimation of the energy efficiency of the use of downhole compensators of reactive power. *Omskiy nauchny vestnik*, 2018, no. 2, pp. 78–83. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-78-83. In Rus.
  17. Smirnov O.V., Kopyrin V.A. On the issue of using downhole reactive power compensators. *Higher education institutions news. Neft i Gaz*, 2015, no. 2, pp. 68–70. In Rus.
  18. Khamitov R.N., Okhotnikova A.A., Semerov E.I. Reasons for failure of power capacitors for reactive power compensation devices. *Russia is young: advanced technologies are in the industry*, 2015, no. 1, pp. 278–282. In Rus.
  19. Kubarkov Yu.P., Golubeva K.A., Makarov Ya.V. Selection of the power of compensating devices for optimization of losses in the electric network. *Bulletin of the Samara State Technical University. Series: technical sciences*, 2016, no. 4 (52), pp. 77–82. In Rus.
  20. Mishra V., Sharma M.P., Vyas B., Ola S.R. Power loss reduction of 11 kV feeder using capacitor banks to distribution transformers – a case study. *2016 IEEE 1<sup>st</sup> International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853164.
  21. Gharibi S., Mortezaadeh E., Hashemi Aghchegh Badi S.J., Ali V. Feasibility study of geothermal heat extraction from abandoned oil wells using a U-tube heat exchanger. *Energy*, 2018. DOI: 10.1016/j.energy.2018.04.003.
  22. Struchkov I.A., Rogachev M.K. The challenges of waxy oil production in a Russian oil field and laboratory investigations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.082.

Received: 6 September 2018.

#### Information about the authors

**Vladimir A. Kopyrin**, specialist, Industrial University of Tyumen.

**Oleg V. Smirnov**, Dr. Sc., professor, Industrial University of Tyumen.

**Alexey L. Portnyagin**, Cand. Sc., director of the geology and gas-oil production institute of Industrial University of Tyumen.

**Rustam N. Khamitov**, Dr. Sc., professor, Omsk State Technical University.

УДК 669.296.297

## ОЧИСТКА ЦИРКОНИЯ ОТ ГАФНИЯ ИЗ ФТОРИДНЫХ РАСПЛАВОВ С ЩЕЛОЧНЫМИ МЕТАЛЛАМИ

Русаков Игорь Юрьевич<sup>1</sup>,  
IYRusakov@mephi.ru

Софронов Владимир Леонидович<sup>1</sup>,  
VLSofronov@mephi.ru

Макаеев Юрий Николаевич<sup>1</sup>,  
YNMakaseev@mephi.ru

<sup>1</sup> Северский технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, 636036, г. Северск, пр. Коммунистический, 65.

**Актуальность** исследования обусловлена тем, что в атомной энергетике требуется ядерно-чистый цирконий, содержащий не более 0,01–0,05 мас. % гафния, т. к. последний имеет высокое сечение захвата «тепловых» нейтронов. «Сухая» фторидная технология переработки цирконий-содержащего сырья состоит из стадий фторирования элементарным фтором сырья, очистки от примесей и разделения тетрафторидов циркония и гафния, а также металлотермического получения циркония, гафния и сплавов на их основе. Наиболее трудной операцией является очистка тетрафторида циркония от тетрафторида гафния, т. к. их свойства весьма близки.

**Цель работы:** определение и исследование наиболее эффективного способа очистки тетрафторида циркония от гафния, пригодного для использования в промышленных условиях.

**Методы исследования:** теоретический расчёт и экспериментальное определение коэффициента разделения фторидов циркония и гафния в расплаве фторида калия.

**Результаты.** Проведены расчёты, которые показали, что использование фторида калия увеличивает коэффициент разделения тетрафторидов циркония и гафния по сравнению с вакуумной сублимацией без разделительных агентов; увеличение содержания фторида калия в разделяемой смеси фторидов приводит к увеличению эффективности процесса разделения и при содержании фторида калия 0,12 мас. долей коэффициент разделения достигает максимального значения; температура незначительно влияет на коэффициент разделения тетрафторидов циркония и гафния. Эксперименты подтвердили результаты расчёта, что при начальной концентрации фторида калия 12 мас. % и степени сублимации 68,0 %, коэффициент очистки составляет 2,59. Несмотря на то, что коэффициент очистки в присутствии фторида калия достаточно высокий, однако за одну ступень разделения снизить концентрацию гафния в тетрафториде циркония с 2 до 0,05 % и ниже не удаётся. Поэтому были проведены несколько последовательных процессов сублимации тетрафторида циркония. Десублимат, полученный после двукратной вакуумной сублимации тетрафторида циркония с содержанием гафния 0,82 мас. %, спекали с фторидом калия и подвергали вакуумной сублимации. Полученный десублимат исследовали на содержание в нём гафния, смешивали с фторидом калия, и так опыт повторяли несколько раз. Из результатов опытов следует, что, хотя эффективность очистки снижается по мере уменьшения концентрации гафния, достаточно шести циклов очистки для получения тетрафторида циркония реакторной (ядерной) чистоты.

**Выводы.** Предложены и исследованы методы разделения тетрафторидов циркония и гафния из фторидных расплавов с щелочными металлами. Было показано, что коэффициент разделения тетрафторидов достигает значения 2,59. Этот метод позволяет получить тетрафторид циркония реакторного качества.

### Ключевые слова:

Тетрафторид циркония, тетрафторид гафния, фторид калия, расплав, сорбционное разделение, коэффициент разделения.

### Введение

Цирконий, содержащий не более 0,01–0,05 мас. % гафния требуется для применения в ядерной энергетике, т. к. последний имеет высокое сечение захвата «тепловых» нейтронов [1–3]. В Северском технологическом институте НИЯУ МИФИ проводятся исследования по разработке «сухой» фторидной технологии переработки различного цирконий-содержащего сырья, которая включает следующие основные стадии: фторирование элементарным фтором, очистка от примесей и разделение тетрафторидов циркония и гафния и металлотермическое восстановление металлов. Наиболее трудной операцией является очистка тетрафторида циркония (ТФЦ) от тетрафторида гафния (ТФГ), т. к. их свойства весьма близки.

В мировой практике цирконий технической чистоты получают в виде губки методами магниетер-

мии, восстанавливая магнием тетрахлорид циркония, и кальциетермии, восстанавливая кальцием тетрафторид циркония. Содержание циркония в циркониевой губке технической чистоты составляет 99,0–99,8 %.

Удаление примесей из металлических слитков циркония до ядерной чистоты производят следующими методами:

- перегонка в вакууме;
- термическое разложение летучих соединений металлов карбонильным или йодидным способом;
- зонная плавка;
- электрохимическое рафинирование металлов [4].

Очистку тетрафторида циркония от тетрафторида гафния можно осуществлять как многократной вакуумной сублимацией тетрафторидов, так и сублимацией тетрафторидов в присутствии активных добавок (фторидов железа, никеля, кобальта, каль-

ция и других). В первом случае для очистки циркония от гафния до ядерной чистоты требуется проведение 10–12 циклов сублимации, во втором – до 8 циклов. Применение указанных активных добавок увеличивает коэффициент разделения циркония от гафния и сокращает число циклов сублимации, однако их количество остаётся достаточно большим для использования в промышленных масштабах [5]. Кроме того, есть трудности, связанные с регенерацией этих активных добавок (сорбентов) после их использования, поэтому работы по поиску оптимальных по составу и свойствам активных добавок остаются актуальными.

При выборе активных добавок (сорбентов) следует придерживаться следующих правил [6]:

- 1) они должны увеличивать разность относительных летучестей тетрафторидов циркония и гафния;
- 2) сорбенты должны быть менее летучими, чем разделяемые компоненты, безопасными в обращении, доступными и иметь низкую стоимость;
- 3) сорбенты не должны корродировать аппаратуру и разлагаться при температурах разделения.

Наиболее полно этим требованиям удовлетворяет фторид калия. Во-первых, присутствуя в смеси разделяемых тетрафторидов циркония и гафния в виде фтороцирконата и фторогафната калия, он способствует очистке циркония от гафния [7, 8]. Во-вторых, являясь отходом при получении металлического циркония электролизом фтороцирконата калия, фторид калия доступен и дешёв, а по токсичности и коррозионному воздействию на оборудование он не превышает тетрафториды циркония и гафния. Фторид калия не разлагается при температурах до 1000 °С и при этом имеет низкую упругость паров.

#### Методы исследования и характеристики исследованных веществ

*Расчёт коэффициента разделения фторидов циркония и гафния в присутствии фторида калия.* При сублимации веществ, имеющих различные температуры возгонки, коэффициент разделения  $K$  (или относительная летучесть) выражается как отношение упругостей паров над чистыми компонентами [9, 10] по формуле (1)

$$K = \frac{P_1^0}{P_2^0}, \quad (1)$$

где  $P_1^0, P_2^0$  – упругости паров тетрафторидов циркония и гафния, соответственно.

Для реальной бинарной системы, путём введения коэффициентов активности, получим

$$K = \frac{P_1^0 \cdot \gamma_1^0}{P_2^0 \cdot \gamma_2^0}, \quad (2)$$

где  $\gamma_1^0, \gamma_2^0$  – коэффициенты активности тетрафторидов циркония и гафния, соответственно.

Для разбавленных растворов с содержанием гафния в цирконии менее 3 мас. % [11] коэффици-

ент активности микрокомпонента ( $\text{HfF}_4$ )  $\gamma_2^0$  можно принять равным 1 (неограниченно смешивающихся между собой). При этом относительная летучесть  $K_0$  не зависит от степени разбавления, и её можно определить по формуле (3):

$$K_0 = \frac{P_1^0 \cdot \gamma_1^0}{P_2^0}, \quad (3)$$

где  $K_0$  – относительная летучесть для бесконечно разбавленных растворов.

При введении в систему активной добавки значение относительной летучести изменится. Зависимость между коэффициентом разделения в присутствии активной добавки  $K_p$  и коэффициентом разделения бинарной смеси выражается формулой (4) [12]:

$$\frac{K_p}{K} = \frac{\gamma_{1a} \cdot \gamma_2^0}{\gamma_1^0 \cdot \gamma_{2a}}, \quad (4)$$

где  $\gamma_{1a}, \gamma_{2a}$  – коэффициенты активности тетрафторидов циркония и гафния в присутствии активной добавки.

Подставив это выражение в формулу (2), получим

$$K_p = \frac{P_1^0 \cdot \gamma_{1a}}{P_2^0 \cdot \gamma_{2a}}. \quad (5)$$

Для расчёта коэффициента разделения  $K_p$  тетрафторидов циркония и гафния в присутствии фторида калия, когда содержание фторида гафния более 3 мас. %, следует использовать формулу (5). В том же случае, когда содержание фторида гафния менее 3 мас. %, что соответствует смеси ТФЦ и ТФГ, полученной путём фторирования природных концентратов (циркона и бадделейта), формулу (5) можно преобразовать в формулу (6)

$$K_p = \frac{P_1^0 \cdot \gamma_{1a}}{P_2^0}, \quad (6)$$

т. е. коэффициент активности фторида гафния ( $\gamma_{2a}$ ) можно принять равным 1.

Упругости паров тетрафторидов циркония и гафния можно рассчитать по уравнениям [13, 14]:

$$\lg P_1^0 = -\frac{11597}{\dot{O}} + 14,825, \quad (7)$$

$$\lg P_2^0 = -\frac{11895}{\dot{O}} + 14,435, \quad (8)$$

где  $P$  выражено в Па.

Уравнение (7) применимо при температурах 889–1177 К, а уравнение (8) – при 924–1229 К, т. е. соответствуют температурному интервалу сублимационной очистки ТФЦ от ТФГ (973–1123 К).

В литературе нет сведений о значениях коэффициента активности тетрафторидов циркония и гафния в бинарной и в тройной смеси с фторидом калия, поэтому используем формулу Мюллера [15], которая позволяет приближённо рассчитать активность ТФЦ в присутствии фторида калия по имеющимся диаграммам систем  $\text{KF} - \text{ZrF}_4$  и  $\text{KF} - \text{HfF}_4$

$$\lg a = \Delta H \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) + \Delta C_p \left( 2,3 \lg \frac{T_0}{T} - \frac{T_0 - T}{T} \right), \quad (9)$$

где  $a$  – активность кристаллизующегося компонента;  $T_0$ ,  $T$  – температуры кристаллизации (плавления) чистого компонента и смеси, соответственно, К;  $\Delta H$  – теплота плавления чистого компонента, Дж/моль;  $\Delta C_p$  – разность теплоёмкостей чистого компонента в твёрдом и жидком состоянии, Дж/(моль·К).

Перерасчёт активности с температуры кристаллизации  $T$  до любой температуры  $T_1$  можно проводить по формуле [16]:

$$\lg a_{T_1} = \frac{T}{T_1} \lg a + \frac{T_1 - T}{T} \lg x, \quad (10)$$

где  $x$  – мольная доля компонента в расплаве.

Результаты расчёта коэффициента разделения тетрафторидов циркония и гафния в смеси с KF, проведённые по формулам (5)–(10), представлены в табл. 1, а для температур 973 и 1073 К графически представлены на рис. 1 (кривые 1, 2).

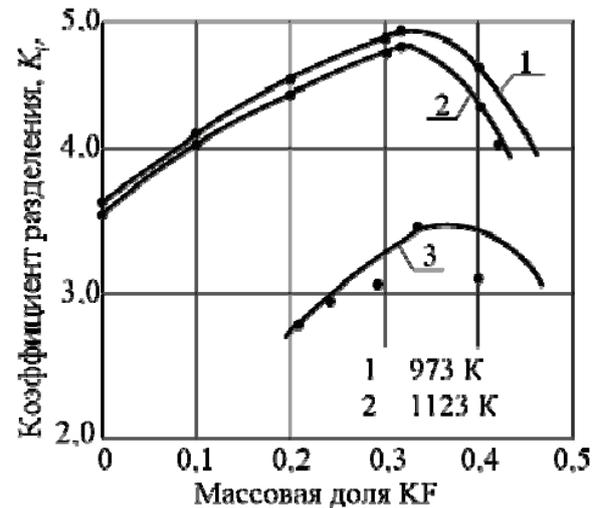
**Таблица 1.** Термодинамические характеристики разделения смеси тетрафторидов циркония и гафния в присутствии фторида калия

**Table 1.** Thermodynamic characteristics of separation of a mixture of zirconium and hafnium tetrafluorides in the presence of potassium fluoride

Температура, К Temperature, K	Упругость пара, Па Steam tension, Pa		Содержание фторида калия, доли Potassium fluoride content, fractions		Активность $a$ тетрафторида в смеси с KF Activity $a$ of tetrafluoride in mixture with PF		Коэффициент активности, $\gamma$ Activity coefficient, $\gamma$		Коэффициент разделения, $K_p$ Separation factor, $K_p$
	ТФЦ ZTF	ТФГ HTF	моль mole	мас. weight	ТФЦ ZTF	ТФГ HTF	ТФЦ ZTF	ТФГ HTF	
973	628	173	0	0	1,00	1,00	1,00	1,00	3,62
			0,10	0,04	1,00	1,00	1,11	1,11	4,02
			0,20	0,07	1,00	0,99	1,25	1,24	4,52
			0,30	0,11	0,95	0,91	1,26	1,28	4,91
			0,33	0,12	0,92	0,84	1,37	1,26	4,96
			0,40	0,14	0,76	0,68	1,27	1,13	4,61
			0,42	0,15	0,64	0,59	1,11	1,02	4,02
0,50	0,18	0,65	0,33	1,29	0,66	4,67			
1023	2640	729	0	0	1,00	1,00	1,00	1,00	3,64
			0,10	0,04	1,00	1,00	1,11	1,11	4,04
			0,20	0,07	0,99	0,98	1,26	1,22	4,51
			0,30	0,11	0,93	0,80	1,34	1,38	4,86
			0,33	0,12	0,80	0,83	1,35	1,34	4,91
			0,40	0,14	0,75	0,67	1,24	1,12	4,52
			0,42	0,15	0,63	0,58	1,08	1,00	3,93
0,50	0,18	0,62	0,33	1,24	0,66	4,53			

Из данных, приведённых в табл. 1 и рис. 1 (кривые 1, 2), следует, что с увеличением концентрации фторида калия до 0,33 мас. долей коэффициент разделения циркония от гафния увеличивается. При дальнейшем же росте концентрации фторида калия он уменьшается. Кроме того, коэффициент разделения для бинарной системы, содер-

жащей ТФЦ и ТФГ, с увеличением температуры в интервале от 973 до 1123 К практически не изменяется и находится в пределах от 3,62 до 3,67. В присутствии фторида калия, с увеличением температуры коэффициент разделения несколько уменьшается, причём, тем сильнее, чем больше концентрация фторида калия.



1, 2 – расчётные данные; 3 – экспериментальные данные  
 1, 2 – calculation data; 3 – experimental data

**Рис. 1.** Зависимость коэффициента разделения от состава расплава и температуры

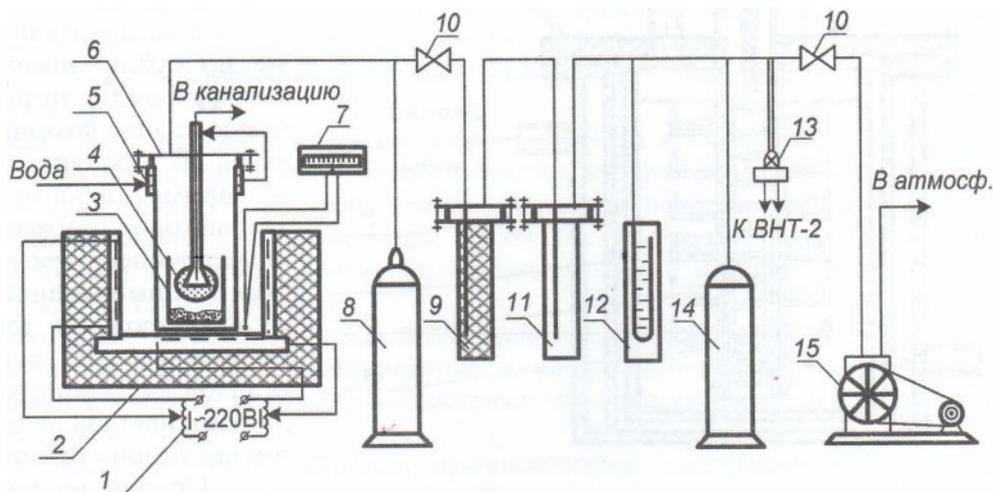
**Fig. 1.** Dependence of the separation factor on melt composition and temperature

На основании результатов проведённых расчётов и графиков, представленных на рис. 1, можно сделать следующие выводы:

- фторид калия увеличивает коэффициент разделения тетрафторидов циркония и гафния по сравнению с вакуумной сублимацией без разделительных агентов;
- увеличение содержания фторида калия в разделяемой смеси фторидов приводит к увеличению эффективности процесса разделения и при содержании фторида калия 0,12 мас. долей коэффициент разделения достигает максимального значения;
- температура незначительно влияет на коэффициент разделения тетрафторидов циркония и гафния.

Экспериментальные исследования по очистке ТФЦ от ТФГ в присутствии сорбента фторида калия проводили с помощью установки, представленной на рис. 2.

В опытах использовали фториды циркония и гафния, синтезированные фторированием элементарным фтором бадделеита ( $ZrO_2$ ) и циркона ( $ZrSiO_4$ ) в никелевом реакторе. Далее фториды очищали вакуумной сублимацией, десублимат измельчали до частиц менее 0,5 мм. Содержание примесей в исследуемых тетрафторидах определяли спектральным, химическим, нейтронно-активным и атомно-абсорбционным методами.



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки: 1 – автотрансформатор; 2 – муфельная печь; 3 – стакан с исходным продуктом; 4 – конденсатор; 5 – холодильник; 6 – корпус сублиматора; 7 – милливольтметр; 8 – баллон с аргоном; 9 – ловушка с активированным углём; 10 – вентиль; 11 – пылеотбойник; 12 – U-образный ртутный манометр; 13 – манометрическая лампа; 14 – ресивер; 15 – вакуумный насос

**Fig. 2.** Design of the experimental apparatus: 1 is the autotransformer; 2 is the muffle furnace; 3 is the glass with raw product; 4 is the capacitor; 5 is the refrigerator; 6 is the frame of sublimator; 7 is the millivoltmeter; 8 is the argon container; 9 is the activated carbon trap; 10 is the valve; 11 is the dust separator; 12 is the U-shaped mercury manometer; 13 is the manometer bulb; 14 is the receiver; 15 is the vacuum pump

Исследования по определению зависимости коэффициента разделения от концентрации фторида калия в разделяемой смеси тетрафторидов циркония и гафния проводили следующим образом. В стакан – 2 загружали исходную смесь фторидов массой 20 г, содержащую 7 мас. % фторида калия и 0,62 мас. % гафния по отношению к цирконию, и спекали при температуре 1123 К в течение 20 мин под давлением аргона 0,12 МПа. Затем температуру снижали до 1023 К, а остаточное давление доводили до 66–93 Па и проводили сублимацию ТФЦ и ТФГ. Через заданный интервал времени сублимацию тетрафторидов прекращали путём увеличения давления в сублиматоре до 0,15 МПа. Десублимат

тетрафторидов циркония и гафния извлекали из сублиматора и взвешивали. После этого сублиматор с остатком смеси опять нагревали до 1023 К в атмосфере аргона, затем вакуумировали систему и сублимировали новую порцию тетрафторидов и т. д. Каждую порцию десублимата анализировали на содержание гафния. Количество и концентрацию гафния в остатке рассчитывали по материальному балансу. Зная содержание гафния в десублимате ( $C_d^{Hf}$ ) и в остатке ( $C_{ост}^{Hf}$ ), коэффициент разделения рассчитывали по формуле (11) [17]:

$$K_p = \frac{\tilde{N}_{ост}^{Hf} (100 - C_d^{Hf})}{C_d^{Hf} (100 - C_{ост}^{Hf})} \quad (11)$$

**Таблица 2.** Показатели процесса сублимационной очистки тетрафторида циркония от гафния в присутствии сорбента KF

**Table 2.** Indices of zirconium tetrafluoride sublimation purification from hafnium in the presence of potassium fluoride

Время процесса сублимации, $\tau_s$ , мин/Sublimation time, $\tau_s$ , min	1	2	4	6	9	14	44	134
Степень сублимации, $\alpha_s$ , %/Sublimation degree, $\alpha_s$ , %	25,5	33,0	49,4	58,6	68,7	76,2	83,7	87,4
Концентрация гафния в десублимате, $C_d^{Hf}$ , мас. % Hafnium concentration in desublimite, $C_d^{Hf}$ , wt. %	0,27	0,27	0,30	0,30	0,33	0,43	0,49	0,54
Концентрация гафния в остатке, $C_{ост}^{Hf}$ , мас. % Hafnium concentration in residue, $C_{res}^{Hf}$ , wt. %	0,74	0,78	0,92	1,06	1,22	1,49	1,82	2,19
Коэффициент разделения, $K_p$ /Separation factor, $F_s$	2,74	2,89	3,07	3,56	3,16	3,50	3,76	4,13
Массовая доля тетрафторида циркония в остатке Mass fraction of zirconium tetrafluoride in residue	0,908	0,899	0,871	0,846	0,806	0,760	0,684	0,626
Массовая доля фторида калия в остатке Mass fraction of potassium fluoride in residue	0,092	0,101	0,129	0,154	0,194	0,240	0,316	0,374
Мольная доля фторида калия в остатке Mole fraction of potassium fluoride in residue	0,222	0,241	0,296	0,340	0,405	0,473	0,566	0,629

Примечание. Массовую долю ТФЦ в остатке рассчитывали как сумму массовых долей ТФЦ и ТФГ.

Note: Mass fraction of zirconium tetrafluoride in the residue was calculated as the sum of the mass fractions of zirconium tetrafluoride and hafnium tetrafluoride.

Концентрацию фторида калия в остатке после сублимации ТФЦ рассчитывали по материальному балансу с учётом того, что весь фторид калия оставался в остатке, т. к. в десублимате спектральным анализом KF не был обнаружен. Результаты проведённых экспериментов представлены в табл. 2 и графически изображены на рис. 1 (кривая 3).

Из сравнения коэффициентов разделения ТФЦ и ТФГ в зависимости от состава исходной смеси, полученных расчётным и экспериментальным путём, следует, что кривые имеют аналогичный вид. Причём коэффициенты разделения тетрафторида циркония от гафния в присутствии фторида калия в 1,3–1,5 раза больше, чем при простой вакуумной сублимации.

Для выяснения влияния условий (температуры и начальной концентрации KF) предварительного спекания смеси фторидов циркония, гафния и фторида калия на эффективность разделения тетрафторидов циркония и гафния, а также определения оптимальной продолжительности процесса спекания фторидов провели серию экспериментов. В этих экспериментах продолжительность процесса спекания изменяли в пределах от 0,5 до 60 мин., температуру 973 и 1073 К. Исходная концентрация гафния в смеси составляла  $C_{исх}^{Hf}=1,04$  мас. %, давление аргона при спекании – 0,12 МПа, начальная концентрация фторида калия – 12 мас. % (27,8 моль %), скорость нагревания при спекании – 20 °С/мин, продолжительность процесса сублимации – 16 мин. При этом эффективность разделения тетрафторида циркония от гафния оценивали не коэффициентом разделения, а коэффициентом очистки по формуле (12)

$$K_{оч} = \frac{C_{исх}^{Hf}}{C_d^{Hf}}, \quad (12)$$

где  $C_{исх}^{Hf}$  – содержание гафния в исходном ТФЦ, мас. %.

Коэффициент очистки даёт более наглядное представление об эффективности разделения сравниваемых методов: позволяет рассчитать количество ступеней (циклов) очистки для получения продукта заданной чистоты. Результаты проведённых экспериментов представлены в табл. 3.

Из результатов опытов, приведённых в табл. 3, следует, что с увеличением продолжительности спекания до 20 мин, как при 973 °С, так и при 1073 °С эффективность разделения вначале возрастает, а затем остаётся практически постоянной, поэтому оптимальным временем спекания исходной смеси фторидов приняли 20 мин.

Опыты по изучению влияния начальной концентрации фторида калия и температуры процесса сублимации на процесс разделения тетрафторидов циркония и гафния проводили при концентрации фторида калия от 3 до 25,8 мас. % и температуре сублимации от 973 до 1123 К. Результаты экспериментов представлены в табл. 4.

**Таблица 3.** Влияние продолжительности спекания на эффективность очистки тетрафторида циркония от гафния в присутствии фторида калия

**Table 3.** Influence of agglomeration duration on efficiency of zirconium tetrafluoride purification from hafnium in the presence of potassium fluoride

Продолжительность процесса спекания исходной смеси, мин Duration of base mixture agglomeration process, min	Температура сублимации спека, К Cake sublimation temperature, K					
	973			1073		
	$K_{оч}$	$C_d^{Hf}$	$\alpha_c$	$K_{оч}$	$C_d^{Hf}$	$\alpha_c$
	$K_{pur}$	$C_d^{Hf}$	$\alpha_s$	$K_{pur}$	$C_d^{Hf}$	$\alpha_s$
	%			%		
0,5	2,26	0,46	32,6	1,70	0,61	53,7
5	2,31	0,45	31,5	1,98	0,53	53,3
10	2,42	0,43	30,1	2,17	0,47	52,0
20	2,54	0,41	32,4	2,31	0,45	54,7
30	2,55	0,42	30,6	2,33	0,43	53,5
40	2,54	0,41	31,7	2,32	0,44	54,1
60	2,48	0,42	30,9	2,31	0,43	54,6

**Таблица 4.** Влияние начальной концентрации фторида калия и температуры процесса сублимации на эффективность очистки тетрафторида циркония от гафния

**Table 4.** Influence of the initial potassium fluoride concentration and sublimation temperature on efficiency of zirconium tetrafluoride purification from hafnium

Концентрация фторида калия в смеси Potassium fluoride concentration in mixture		Температура сублимации, К Sublimation temperature, K								
		973			1073			1173		
		Концентрация гафния в исходной смеси, $C_{исх}^{Hf}$ , мас. %								
		Hafnium concentration in base mixture, $C_{бас}^{Hf}$ , wt. %								
		0,65			1,04			0,85		
мас. % wt. %	Моль % Mole %	$C_d^{Hf}$ , %	$K_{оч}/K_{pur}$ , %	$\alpha_c/\alpha_s$ , %	$C_d^{Hf}$ , %	$K_{оч}/K_{pur}$ , %	$\alpha_c/\alpha_s$ , %	$C_d^{Hf}$ , %	$K_{оч}/K_{pur}$ , %	$\alpha_c/\alpha_s$ , %
03,0	08,0	0,40	1,63	71,5	0,68	1,53	77,0	0,5	1,70	82,5
7,0	17,5	0,36	1,81	68,0	0,51	1,70	75,2	0,43	1,98	79,0
10,0	23,9	0,30	2,16	50,0	0,46	2,25	73,6	0,41	2,24	76,6
12,0	27,8	0,26	2,50	43,9	0,42	2,46	71,2	0,36	2,36	75,0
14,8	32,9	0,23	2,83	47,8	0,40	2,59	68,0	0,32	2,66	72,5
17,0	36,7	–	–	–	0,37	2,85	52,6	–	–	–
20,2	41,7	–	–	–	0,32	3,26	41,0	–	–	–
25,8	49,6	–	–	–	0,30	3,44	24,2	–	–	–
		–	–	–	0,26	3,96	8,62	–	–	–

Из результатов опытов, приведённых в табл. 4, следует, что эффективность очистки тетрафторида циркония от гафния возрастает с увеличением концентрации фторида калия и незначительно зависит от температуры процесса в указанном интервале температур. При температуре 1073 К зависимость коэффициента очистки от начальной концентрации фторида калия ( $C_{KF}^0$ ) удовлетворительно (погрешность  $(\pm 6)$  %) описывается уравнением (13)

$$K_{оч} = 1,50 + 0,096 C_{KF}^0. \quad (13)$$

Для определения оптимальной концентрации фторида калия использовали формулу для предельной степени сублимации ( $\alpha_{\text{пр}}$ ) тетрафторида циркония из бинарной системы с фторидом калия [18, 19]

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{(C_0 - C_{\text{пр}}) \cdot 10^4}{C_0(100 - C_{\text{пр}})}, \quad (14)$$

где  $C_0$  – начальная концентрация фторида циркония, мас. %;  $C_{\text{пр}}$  – предельная концентрация фторида циркония, мас. %.

Среднее значение предельной концентрации тетрафторида циркония в десублимате в экспериментах без добавления фторида калия при 1073 К составила 77,0 мас. % (табл. 4). Тогда формулу (14) можно записать в виде формулы (15)

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{(C_0 - 77,0) \cdot 10^4}{31,2C_0}. \quad (15)$$

Для нахождения оптимальной концентрации фторида калия, т. е. когда при достаточно высоком выходе ТФЦ в десублимат коэффициент очистки был значительным, использовали критерии оптимизации – критерий Хенкока ( $E_x$ ) по формуле (16) и критерий Фоменко ( $E_\Phi$ ) по формуле (17):

$$E_x = \frac{\alpha}{100} \left( 1 - \frac{1}{K_{\text{оч}}} \right), \quad (16)$$

$$E_\Phi = \frac{\alpha}{100} \left( 1 - \frac{\alpha}{100K_{\text{оч}}} \right). \quad (17)$$

Эти критерии связывают выход продукта ( $\alpha$ ) с эффективностью очистки ( $K_{\text{оч}}$ ) и применяются для разделительных процессов [20–22].

Расчёт показал, что оптимальная начальная концентрация фторида калия составляет около 12 мас. %. При этом степень сублимации ТФЦ равна 70 %, а коэффициент очистки – 2,66.

Проведённые эксперименты подтвердили результаты расчёта. Так, при начальной концентрации фторида калия 12 мас. % степень сублимации составила 68,0 %, а коэффициент очистки – 2,59. С дальнейшим увеличением содержания фторида калия в системе и температуры процесса коэффициент разделения уменьшается. Такое снижение коэффициента разделения можно объяснить тем, что с увеличением этих факторов уменьшается разница в термической устойчивости фтороцирконатов и фторогафнатов [18].

Несмотря на то, что коэффициент очистки в присутствии фторида калия достаточно высокий, за одну ступень разделения снизить концентрацию гафния в тетрафториде циркония с 2 до 0,05 % и ниже не удаётся. Поэтому провели несколько последовательных процессов сублимации ТФЦ. Десублимат, полученный после двукратной вакуумной сублимации ТФЦ с содержанием гафния ( $C_{\text{Hf}}^{\text{исх}}$ ) 0,82 мас. %, спекали с фторидом калия и подвергали вакуумной сублимации. Полученный десублимат исследовали на содержание в нём гафния,

смешивали с фторидом калия, и так опыт повторяли несколько раз. Результаты экспериментов графически приведены на рис. 3.

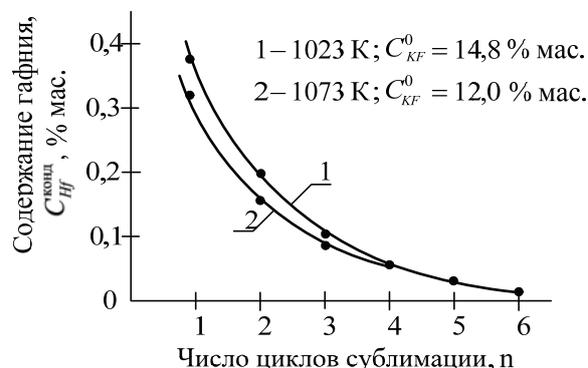


Рис. 3. Зависимость содержания гафния в десублимате ТФЦ от количества циклов сублимации ( $n$ ) и условий эксперимента

Fig. 3. Dependence of hafnium content in zirconium tetrafluoride desublimat on the number of sublimation cycles ( $n$ ) and experimental conditions

Из результатов опытов, приведённых на рис. 3, следует, что, хотя эффективность очистки снижается по мере уменьшения концентрации гафния, достаточно 6 циклов очистки для получения ТФЦ реакторной (ядерной) чистоты.

#### Выводы

1. Проведены расчёты, показывающие, что использование фторида калия увеличивает коэффициент разделения тетрафторидов циркония и гафния по сравнению с вакуумной сублимацией без разделительных агентов, а увеличение содержания фторида калия в разделяемой смеси фторидов приводит к увеличению эффективности процесса разделения и при содержании фторида калия 0,12 мас. долей коэффициент разделения достигает максимального значения.
2. Температура процесса разделения тетрафторидов циркония и гафния из расплава фторида калия незначительно влияет на коэффициент разделения.
3. Подтверждено экспериментально, что при начальной концентрации фторида калия 12 мас. % и степени сублимации 68,0 % коэффициент очистки составляет 2,59. Несмотря на то, что коэффициент очистки в присутствии фторида калия достаточно высокий, за одну ступень разделения снизить концентрацию гафния в тетрафториде циркония с 2 до 0,05 % и ниже не удаётся.
4. Проведены несколько последовательных процессов сублимации ТФЦ, при которых десублимат спекали с фторидом калия и подвергали вакуумной сублимации. По результатам опытов получено, что эффективность очистки снижается по мере уменьшения концентрации гафния; достаточно шести циклов очистки для получения ТФЦ реакторной (ядерной) чистоты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дробот Д.В., Лысакова Е.И., Резник А.М. Химия и технология циркония и гафния. – М.: МИТХТ им. М.В. Ломоносова, 2013. – 88 с.
2. Zirconium in the Nuclear Industry // 6 Int. Symp. / Eds. D.G. Franklin, R.B. Adamson. – Vancouver, 28 June – 1 July, 1982. – Philadelphia, Pa: ASTM, 1984. – 858 p.
3. Высокочистые титан, цирконий и гафний в ядерной энергетике / М.Л. Коцарь, С.А. Лавриков, В.И. Никонов, А.В. Александров, С.Г. Ахтонов // Атомная энергия. – 2011. – Т. 111. – № 2. – С. 72–77.
4. Получение металлов высокой чистоты. URL: <http://lekt-sii.org/7-11132.html> (дата обращения 03.04.2018).
5. Разделение фторидов циркония и гафния сублимационно-сорбционным методом / И.Ю. Русаков, А.С. Буйновский, В.Л. Софронов, Л.Д. Агеева // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2016. – № 3. – С. 20–27.
6. Коган В.Б. Азеотропная и экстрактивная ректификация. 2-е изд., доп. и пер. – Л.: Химия, 1971. – 432 с.
7. Dullencopf H. Elektrochemische Untersuchungen von Zirkonium in  $KCl-LiF-HfCl_4$  // Zeitschrift für anorganische Chemie. – 1934. – № 333. – P. 161–164.
8. Raman and Electrochemical Study of Zirconium in  $LiCl-KCl-LiF-ZrCl_4$  / Ben-Lin Yao, Kui Liu, Ya-Lan Liu, Li-Yong Yuan, Hui He, Zhi-Fang Chai, Wei-Qun Shi // Journal of Electrochemical society. – 2018. – № 165 (2). – P. 6–12.
9. Чистые и сверхчистые металлы: получение методом дистилляции в вакууме / В.Е. Иванов, И.И. Папилов, Г.Ф. Тихинский, В.М. Амоненко. – М.: Металлургия, 1965. – 263 с.
10. Глебовицкий В.А., Седова И.С. Коэффициенты разделения литофильных, редкоземельных и высокозарядных элементов в мигматитах гранулитовой фации, Нимнырский блок Алданского щита // Доклады Академии наук. – 2015. – Т. 462. – № 2. – С. 197–203.
11. Мелвин-Хьюз Э.А. Физическая химия. Кн. 1 / перевод с англ., под общ. ред. чл.-корр. АН СССР Я.И. Герасимова. – М.: Иностран. литература, 1962. – 520 с.
12. Kipourous G.J., Flengas S.N. Electrorefining of Zirconium Metal in Alkali Chloride and Alkali Fluoride Fused Electrolytes // Journal of Electrochemical society. – 1985. – V. 132. – Iss. 5. – P. 1087–1098.
13. Fischer W., Petzel T. Sttigungsdruckmessungen und einigen Metallhalogeniden nach dem «Glockenverfahren» // Zeitschrift für anorganische und allgemeint Chemie. – 1964. – B. 333. – H. 4–6. – S. 226–234.
14. Solovyev A.I., Maljutina V.M. Production of metallic zirconium tetrafluoride purified from hafnium to reactor purity // Russ. J. Non-Ferr. Met. – 2002. – № 43. – P. 14–18.
15. Пазухин В.А., Фишер А.Я. Разделение и рафинирование металлов в вакууме. – М.: Металлургия, 1969. – 203 с.
16. Годнева М.М., Мотов Д.Л. Химия фтористых соединений циркония и гафния. – Л.: Наука, 1971. – 111 с.
17. Девятых Г.Г., Еллиев Ю.Е. Глубокая очистка веществ. – М.: Высш. шк., 1990. – 192 с.
18. Rusakov I.Yu., Buinovskii A.S., Sofronov V.L. Removal of impurities from zirconium tetrafluoride using metallic zirconium chips // Russian Metallurgy (Metally). – 2016. – V. 11. – P. 1078–1082.
19. Kipourous G.I., Flegas S.N. Electrorefining of zirconium metal in alkali chloride and alkali fluoride fused electrolytes // J. Electrochem. Soc. – 1981. – V. 132. – № 5. – P. 1087–1097.
20. Будников П.П., Гинстлинг А.М. Реакции в смесях твёрдых веществ. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Стройиздат, 1971. – 488 с.
21. Molten Salts: V. 4. P. 1. Fluorides and Mixtures. Electrical Conductance, Density, Viscosity and Surface Tension Data / G.Y. Janz, G.L. Gardne, U. Krebs, et al. // J. Phys. and Chem. Ref. Data. – 1974. – V. 3. – № 1. – P. 1–116.
22. Технологический каскад для очистки тетрафторида циркония от гафния с использованием диоксида циркония / И.Ю. Русаков, А.С. Буйновский, В.Л. Софронов, Л.М. Левченко // Химия в интересах устойчивого развития. – 2016. – Т. 24. – № 6. – С. 789–794.

Поступила 11.04.2018 г.

#### Информация об авторах

**Русаков И.Ю.**, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических и атомных производств Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

**Софронов В.Л.**, доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии материалов современной энергетике Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

**Макаеев Ю.Н.**, кандидат технических наук, доцент кафедры химии и технологии материалов современной энергетике Северского технологического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ».

UDK 669.296.297

**ZIRCONIUM PURIFICATION FROM HAFNIUM FROM FLUORIDE MELTS WITH ALKALINE METALS**Igor Y. Rusakov<sup>1</sup>,  
IYRusakov@mephi.ruVladimir L. Sofronov<sup>1</sup>,  
VLSofronov@mephi.ruYuri N. Makaseev<sup>1</sup>,  
YNMakaseev@mephi.ru<sup>1</sup> Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University «MEPhI»,  
65, Kommunistichesky avenue, Seversk, 636036, Russia.

**The relevance** of the study is conditioned by the fact that the nuclear-power engineering requires nuclear-pure zirconium with the content of hafnium not more than 0,01–0,05 wt. %, as hafnium has high capture cross-section of «thermal» neutrons. The «dry» fluoride technology of treatment of zirconium-containing raw materials consists of the following stages: raw material fluorination with elemental fluorine, purification and separation of zirconium and hafnium tetrafluorides, metal-thermal production of zirconium, hafnium and their alloys. Purification of zirconium tetrafluoride from hafnium tetrafluoride is the most difficult operation, because their properties are very similar.

**The aim** of the work is to determine and study the most effective way of purification of zirconium tetrafluoride from hafnium, which is suitable for use in industrial conditions.

**Research methods:** theoretical calculation and experimental determination of separation factor of zirconium and hafnium fluorides in a melt of potassium fluoride.

**Results.** The calculations carried out show that potassium fluoride increases the separation factor of zirconium and hafnium tetrafluorides as compared with vacuum sublimation without separation agents. The increase in the content of potassium fluoride in the fluoride mixture to be separated leads to increase in the efficiency of separation, and the separation factor reaches a maximum value when the potassium fluoride content of 0,12 wt. %. Temperature has an insignificant effect on the separation factor of zirconium and hafnium tetrafluorides. The experiments confirm the following results of the calculation: the degree of sublimation is 68,0 % and the cleaning factor is 2,59 at the initial concentration of potassium fluoride of 12 wt. %. Despite the fact that the purification coefficient in the presence of potassium fluoride is high enough, it is impossible to reduce the hafnium concentration in zirconium tetrafluoride from 2 to 0,05 % or below during one separation stage. Therefore, several successive sublimation processes of zirconium tetrafluoride were carried out. The desublimates, obtained after a double vacuum sublimation of zirconium tetrafluoride with the hafnium content of 0,82 wt. %, was sintered with potassium fluoride and it was subjected to vacuum sublimation. The obtained desublimates were examined for its hafnium content; it was mixed with potassium fluoride; the experiment was repeated several times. The experiment results demonstrate that although the purification efficiency decreases as the concentration of hafnium decreases, six decontamination cycles are sufficient to obtain reactor-grade zirconium tetrafluoride.

**Summary.** The authors have proposed and studied the separation methods of zirconium and hafnium tetrafluorides from fluoride melts with alkaline metals. It was shown that the separation factor of tetrafluorides reaches the value of 2,59, i. e. this technique makes it possible to obtain reactor-grade zirconium tetrafluoride.

**Key words:**

Zirconium tetrafluoride, hafnium tetrafluoride, potassium fluoride, melt, sorption separation, separation factor.

**REFERENCES**

1. Drobot D.B., Lysakova E.I., Reznik A.M. *Khimiya i tekhnologiya tsirconiya i hafniya* [Chemistry and technology of zirconium and hafnium]. Moscow, M.V. Lomonosov Moscow Technological University Publ., 2013. 88 p.
2. Zirconium in the Nuclear Industry. *6 Int. Symp.* Eds. D.G. Franklin, R.B. Adamson. Vancouver, 28 June – 1 July, 1982. Philadelphia, Pa, ASTM, 1984. 858 p.
3. Kotsar M.L., Lavrikov S.A., Nikonov V.I., Aleksandrov A.V., Akhontov S.G. Vysokochistye titan, tsirkoniy i gafniy v yadromoy energetike [High-purity titanium, zirconium and hafnium in nuclear power engineering]. *Atomic Energy*, 2011, vol. 111, no. 2, pp. 72–77.
4. *Poluchenie metallov vysokoy chistoty* [Obtaining high-purity metals]. Available at: <http://lektsii.org/7-11132.html> (accessed 3 April 2018).
5. Rusakov I.Yu., Buynovskiy A.S., Sofronov V.L., Ageeva L.D. Separation of zirconium and hafnium fluorides by sublimation-sorption method. *Non-ferrous metallurgy*, 2016. no. 3, pp. 20–27. In Rus.
6. Kogan V.B. *Azeotropnaya i ekstraktivnaya rektifikatsiya* [Azeotropic and extractive distillation]. Moscow, Khimiya Publ., 1971. 432 p.
7. Dullencopf H. Elektrochemische Untersuchungen von Zirkonium in KCl-LiF-HfCl<sub>4</sub> [Electrolytic refining of metallic zirconium in alkaline-chlorine and alkaline-fluoride fused electrolytes]. *Zeitschrift für anorganische Chemie*, 1934, no. 333, pp. 161–164. In Ger.
8. Ben-Lin Yao, Kui Liu, Ya-Lan Liu, Li-Yong Yuan, Hui He, Zhi-Fang Chai, Wei-Qun Shi. Raman and Electrochemical Study of Zirconium in LiCl-KCl-LiF-ZrCl<sub>4</sub>. *Journal of Electrochemical society*, 2018, no. 165 (2), pp. 6–12.
9. Ivanov V.E., Papirova I.I., Tikhinskiy G.F., Amonenko V.M. *Chistye i sverkhchistye metally* [Pure and ultrapure metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1965. 263 p.
10. Glebovitskiy V.A., Sedova I.S. Koeffitsienty razdeleniya litofilnykh, redkozemelnykh i vysokozaryadnykh elementov [Separation coefficients of lithophilic, rare-earth and high-charge elements]. *Doklady Akademii nauk*, 2015, vol. 462, no. 2, p. 197.
11. Melvin-Khyuz E.A. *Fizicheskaya khimiya* [Physical chemistry]. Translated from English, ed. by Ya.I. Gerasimov. Moscow, Inostr. literatura Publ., 1962. B. 1, 520 p.

12. Kipourous G.J., Flengas S.N. Electrorefining of Zirconium Metal in Alkali Chloride and Alkali Fluoride Fused Electrolytes. *Journal of Electrochemical Society*, 1985, vol. 132, Iss. 5, pp. 1087–1098.
13. Fischer W., Petzel T. Sättigungsdruckmessungen und einigen Metallhalogeniden nach dem «Glockenverfahren» [Saturation pressure measurements, and some of the metal halides, according to the «bell method»]. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 1964, vol. 333, no. 4–6, pp. 226–234. In Ger.
14. Solovyev A.I., Malyutina V.M. Production of metallic zirconium tetrafluoride purified from hafnium to reactor purity. *Russ. J. Non-Ferr. Met.*, 2002, no. 43, pp. 14–18.
15. Pazukhin V.A., Fisher A.Ya. *Razdelenie i rafinirovanie metallov v vakuume* [Separation and refining of metals in vacuum]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1969. 203 p.
16. Godneva M.M., Motov D.L. *Khimiya fluoristykh soedineniy tsirkoniya i hafniya* [Chemistry of fluorine compounds of zirconium and hafnium]. Leningrad, Nauka Publ., 1971. 111 p.
17. Devyatykh G.G., Elliev Yu.E. *Glubokaya ochildka veshchestv* [Deep purification of substances]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 192 p.
18. Rusakov I.Yu., Buinovskii A.S., Sofronov V.L. Removal of impurities from zirconium tetrafluoride using metallic zirconium chips. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2016, vol. 11, pp. 1078–1082.
19. Kipourous G.J., Flengas S.N. Electrorefining of zirconium metal in alkali chloride and alkali fluoride fused electrolytes. *J. Electrochem. Soc.*, 1981, vol. 132, no. 5. pp. 1087–1097.
20. Budnikov P.P., Ginstling A.M. *Reaktsii v smesnykh tverdykh veshchestv* [Reactions in mixtures of solids]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1971. 488 p.
21. Janz G.Y., Gardne G.L., Krebs U. Molten Salts: Vol. 4, P. 1. Fluorides and Mixtures. Electrical Conductance, Density, Viscosity and Surface Tension Data. *J. Phys. and Chem. Ref.*, 1974, vol. 3, no. 1, pp. 1–116.
22. Rusakov I.Yu., Buynovskiy A.S., Sofronov V.L., Levchenko L.M. Tekhnologicheskii kaskad dlya ochildki tetrafluorida tsirkoniya ot hafniya s ispolzovaniem dioksida tsirkoniya [Technological cascade for zirconium tetrafluoride purification from hafnium using zirconium dioxide]. *Chemistry for Sustainable Development*, 2016, vol. 24, no. 6, pp. 789–794.

Received: 11 April 2018.

#### Information about the authors

**Igor Y. Rusakov**, Cand. Sc., associate professor, Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Vladimir L. Sofronov**, Dr. Sc., professor, Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University «MEPhI».

**Yuri N. Makaseev**, Cand. Sc., associate professor, Seversk Technological Institute – branch of National Research Nuclear University «MEPhI».

УДК 556.3, 556.314

## ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НАРЫККО-ОСТАШКИНСКОЙ ПЛОЩАДИ ЕРУНАКОВСКОГО РАЙОНА КУЗБАССА

Домрочева Евгения Витальевна<sup>1</sup>,  
DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru

Кузеванов Константин Иванович<sup>2</sup>,  
kki@tpu.ru

Гридасов Александр Геннадьевич<sup>2</sup>,  
gridasov@tpu.ru

Сизиков Дмитрий Александрович<sup>3</sup>,  
D.Sizikov@promgaz.gazprom.ru

<sup>1</sup> Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

<sup>3</sup> Научно-технический центр «Освоение нетрадиционных ресурсов углеводородов»,  
Россия, 117420, г. Москва, ул. Наметкина, 6.

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью изучения состава подземных вод и гидродинамических условий Нарыкско-Осташкинской площади Кузбасса, перспективной для добычи угольного метана.

**Цель работы:** охарактеризовать гидродинамические условия и гидрогеохимические особенности Нарыкско-Осташкинской площади, а также описать условия питания и разгрузки подземных вод для схематизации гидрогеологических условий района разведочных работ на угольный метан.

**Методы.** Химический состав подземных и поверхностных вод исследовался в Проблемной научно-исследовательской гидрогеохимической лаборатории (ТПУ), зарегистрированной в Системе аналитических лабораторий Госстандарта России. Для проведения полного химического анализа использовались традиционные методы. Обработка опытно-фильтрационных работ выполнена по стандартной методике графоаналитического метода временного прослеживания уровня с последующими графическими построениями и вычислениями, выполненными в среде программном комплексе MS Office.

**Результаты** выполненных исследований позволяют уточнить некоторые особенности гидрогеологических условий Нарыкско-Осташкинской площади. Так, по итогам опытно-фильтрационных работ в устье реки Осиновка установлено наличие гидравлической связи подземных вод верхней гидродинамической зоны с поверхностными водотоками, а также определены значения коэффициентов водопроницаемости и уводнепроводности для этой части гидрогеологического разреза. На основе оценки взаимодействия подземных и поверхностных вод по результатам опытно-фильтрационных работ установлено наличие выраженного влияния граничных условий I и III рода на работу гидрогеологических скважин, что позволяет существенно актуализировать гидродинамические модели, которые могут быть использованы для обоснования добычи угольного метана в этом районе. Кроме этого, выяснено, что в пределах массивов слаботрешиноватых пород существуют изолированные напорные системы, формирование которых обусловлено наличием в разрезе прослоев с невысокой водопроницаемостью. По характеру проницаемости в гидрогеологическом разрезе выделяются зоны интенсивного и замедленного водообмена. В гидрогеохимическом отношении с ними коррелируют зоны пресных и солоноватых вод.

### Ключевые слова:

Подземные воды, Кузбасс, Нарыкско-Осташкинская площадь, химический состав, генезис вод, гидродинамические условия.

### Введение

В настоящее время территория Ерунаковского района активно изучается в рамках проекта по освоению нетрадиционных ресурсов метана из угольных пластов и характеризуется существенными геологическими и технологическими рисками, которые особенно значимы на ранних стадиях. [1, 2]. В связи с этим изучение гидрогеологических условий имеет высокую актуальность, т. к. полученные данные будут востребованы при проектировании промышленной добычи угольного метана. Региональные гидрогеологические особенности этого района описаны нами ранее в журнале

«Геология и геофизика» и др. [3–8], а геохимические – в журнале «Известия ТПУ» [9–12]. Несмотря на интенсивное освоение территории, по-прежнему вызывает трудности её низкая гидрогеологическая изученность, выраженная в недостатке гидродинамических и гидрогеохимических наблюдений и опробований.

Проблема изученности подземных вод угленосных отложений в последнее время всё чаще освещается не только в России [1–8, 10, 13–16], но и в зарубежных изданиях [17–31], что связано с повышением интереса к освоению ресурсов угольного метана в различных странах. Наибольший опыт в

данной сфере накоплен в США [27–29], Польше [22] и Австралии [20]. Активно развиваются в этой связи исследования подземных вод угольных бассейнов Китая [18, 19, 21–26].

#### Фактический материал и методы исследования

Томский филиал ИНГГ СО РАН, начиная с 2002 г., ведет совместные работы с ООО «Газпром добыча Кузнецк» по изучению гидрогеологии, гидрогеохимии и экологии территорий потенциальной промышленной добычи угольного метана в Кузбассе. В 2012 и 2014 гг. наши исследования были сосредоточены на территории Нарыкско-Осташкинской площади Ерунаковского района Кемеровской области, являющейся одной из приоритетных площадей для крупномасштабной добычи угольного метана. С 2009 по 2012 гг. здесь пробурили 41 скважину глубиной от 100 до 1200 м, откуда отбирали пробы воды [9]. В 2014 г. было отобрано дополнительно 12 проб на этой территории из глубоких горизонтов. Таким образом, гидрогеохимические условия района анализировались по 124 пробам из 41 скважины (рис. 1).

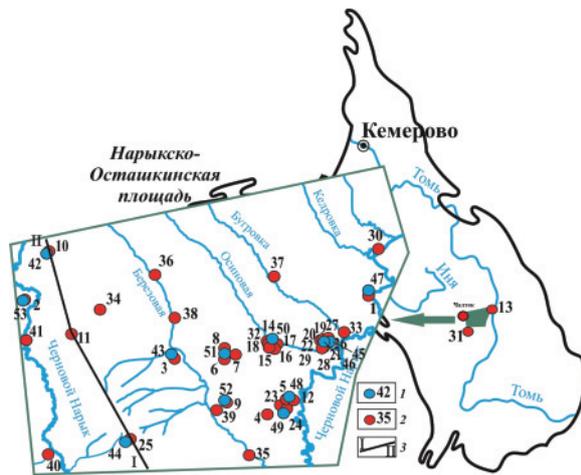


Рис. 1. Обзорная схема отбора проб воды: номер отобранной пробы 1 – в 2014 г.; 2) в период с 2009 по 2013 гг.

Fig. 1. Overview water sampling scheme: sample number 1 – in 2014; 2) in the period from 2009 to 2013

В каждой точке гидрогеохимического опробования непосредственно на месте отбора определялись параметры быстроизменяющихся компонентов и свойств, таких как Eh, pH, температура, ионы  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ . Макрокомпонентный и микрокомпонентный состав вод исследовались в Проблемной научно-исследовательской гидрогеохимической лаборатории Томского политехнического университета, зарегистрированной в Системе аналитических лабораторий Госстандарта России. Для проведения полного химического анализа вод использовались традиционные методы, а также методы спектрального, атомно-абсорбционного анализа и др.

Гидродинамические опробования Нарыкско-Осташкинской площади проведены в период с

2012 по 2013 гг. на двух участках. В районе устья реки Осинковка выполнена кустовая откачка, при которой задействовались одна центральная и четыре наблюдательных скважины. Глубина опробования составила 110 м. В непосредственной близости от западной границы площади, по мере бурения скважины у п. Чалток, выполнены одиночные откачки из двух изолированных толщ. Глубина опробования составила 500 м. Обработка материалов обеих откачек проводилась графоаналитическим методом прямолинейной анаморфозы на основе временного прослеживания изменений уровня в условиях длительной откачки при квазистационарном режиме фильтрации. В основу обработки результатов восстановления уровня после откачки положено представление о формировании этого процесса на основе принципа суперпозиции. В качестве основной расчётной зависимости в обоих случаях использовалось уравнение Тейса-Джейкоба. Графические построения и вычисления выполнены в программном пакете MS Office, для чего была разработана авторская полуавтоматизированная система в среде электронных таблиц Excel.

#### Гидродинамические условия

Нарыкско-Осташкинская площадь расположена в области расчленённого низкогогорного рельефа с таёжным ландшафтом. Особенности гидродинамических условий определяются полукрытым характером территории под влиянием комплексного взаимодействия поверхностных и подземных вод в трещиноватой толще геологического разреза. Территория относится к бассейну реки Томь, гидрографическую сеть формирует река Черновой Нарык и его притоки. В структурном плане площадь приурочена к Кыргай-Осташкинской синклинали (южная часть) и Нарыкской антиклинали (северная часть). Структуры имеют брахиподобную вытянутую форму. В ядре синклинали залегают мезозойские отложения (триас, юра), мощность которых достигает 755 м. В антиклинальной структуре обнаружены пермские отложения ленинской свиты.

По литолого-стратиграфическим и гидродинамическим признакам в районе выделяют водоносные комплексы четвертичных аллювиальных, юрских, триасовых и пермских отложений, а также воды спорадического распространения верхнечетвертичных-современных рыхлых пород.

Ввиду особенностей литологического строения и истории геологического развития рассматриваемой территории проницаемость разреза определяется в основном степенью трещиноватости водовмещающих пород и открытостью трещин. Таким образом, наиболее проницаемым является интервал развития экзогенной трещиноватости, распространённый от кровли скальных пород до глубин 60–180 м.

Как отмечалось ранее [5, 7], для Кузнецкого бассейна в целом характерна прямая вертикаль-

ная гидродинамическая зональность, которая прослеживается и в разрезе Нарыкско-Осташкинской площади. В зависимости от условий движения подземных вод здесь выделяют две гидродинамические зоны: интенсивного и замедленного водообмена.

Зона активного водообмена имеет мощность до 180 м на водораздельных участках и до 80 м в долинах рек. Зона приурочена к области развития экзогенной трещиноватости. Уровень подземных вод наблюдается на глубинах от 40 м на водоразделах до +6 м в долинах водотоков. Величины коэффициента фильтрации меняются от 0,3 до 1,3 м/сут. Наибольшие значения коэффициента фильтрации выявлены в угленосных породах под долинами рек, там же зафиксированы и наибольшие напоры подземных вод. Положение уровней подземных вод свидетельствует об их движении от водораздельных площадей, являющихся областями питания, к долинам рек, которые являются областями разгрузки.

Зона замедленного водообмена охватывает интервал глубин от 160 до 1300 м, возможно и глубже. В этой зоне породы характеризуются меньшей трещиноватостью, чем в зоне интенсивного водообмена, соответственно снижается проницаемость разреза и скорость водообмена. При этом в пределах зоны замедленного водообмена не наблюдается закономерного снижения проницаемости с глубиной, а хорошо проницаемые участки встречаются даже на глубинах более 1000 м [7]. Поскольку верхняя и нижняя гидродинамические зоны связаны системой трещин, их уровеньный режим считается взаимозависимым. Тем не менее в скважине у п. Чалток зафиксировано существенное (50,44 м) различие уровней смежных интервалов проницаемых пород, что свидетельствует о наличии неразрушенных слабопроницаемых прослоев в разделяющей толще. Фильтрационные характеристики разреза определяются трещиноватостью. При этом угольным пластам присуща большая проницаемость, чем смежным породам (аргиллитам, алевролитам и песчаникам), что связано со свойственной им собственной трещиноватостью – кливажом.

При участии авторов в изучаемом районе проведены исследования, результаты которых позволяют существенно расширить представления об особенностях гидродинамических условий Нарыкско-Осташкинской площади.

На восточной части площади, в районе устья реки Осиновка, в 2012 г. выполнена кустовая откачка из водоносного горизонта со свободной поверхностью. В результате определены фильтрационные показатели верхней гидродинамической зоны до глубины 110 м, а также выявлена гидравлическая связь подземных вод верхней зоны с поверхностными водотоками. Коэффициент водопроводимости получен на этапе обработки результатов восстановления уровня в скважинах после откачки, его среднее значение составляет 26,7 м<sup>2</sup>/сут. Коэффициент увнепроводности определен по ре-

зультатам обработки данных о снижении уровней подземных вод в наблюдательных скважинах во время откачки. Среднее значение коэффициента увнепроводности составляет 4,2·10<sup>4</sup> м<sup>2</sup>/сут. Эти значения фильтрационных параметров могут быть использованы в качестве расчётных для выполнения прогнозных гидродинамических расчетов на участке исследований. Обработка графиков временного прослеживания показала, что опытно-фильтрационные работы проводились в условиях взаимодействия с границей первого рода. Таким питающим контуром служит русло реки Осиновки. В силу данного обстоятельства при анализе гидрогеологических условий Нарыкско-Осташкинской площади рекомендуется учитывать тот факт, что малые поверхностные водотоки с расходами, близкими к расходу реки Осиновки и превышающие его, с большой степенью вероятности гидродинамически связаны с потоками подземных вод и должны рассматриваться как граничные условия первого или третьего рода.

Гидродинамическое опробование скважины у п. Чалток, вблизи западной границы Нарыкско-Осташкинской площади, выполнено осенью 2013 г. [14]. Одиночные откачки проводились в интервалах глубин 50–200 и 200–500 м, опробования выполнены последовательно по мере проходки скважины, после тщательной изоляции вышележащих интервалов. В результате получены данные о фильтрационных свойствах и уровненом режиме опробованных толщ (таблица).

**Таблица.** Гидродинамические показатели разреза скважины у п. Чалток

**Table.** Hydrodynamic parameters of the well located near Chaltok village

Интервал глубин, м Depth interval, m	Мощность, м Thickness, m	Статический уровень подземных вод, м Groundwater static level, m	Динамический уровень подземных вод, м Groundwater dynamic level, m	Дебит Q, л/с Flow rate Q, l/s	Удельный дебит q, (л/с)/м Specific yield q, (l/s)/m	Коэффициент водопроницаемости, м <sup>2</sup> /сут Water supply coefficient, m <sup>2</sup> /day
50–200	150	32,42	100,00	1,82	0,03	1,7
200–500	300	82,86	91,25	0,34	0,04	1,5

Результаты опробования позволяют судить о высокой степени изоляции опробованных интервалов глубин, что предполагает возможность выявления изолированных водоносных горизонтов в толще пермских угленосных отложений. Зона замедленного водообмена в целом охарактеризована как слабопроницаемая. Существенного затухания проницаемости с глубиной не выявлено.

#### Гидрогеохимические условия

Обобщение ранее известной информации [14], а также гидродинамических и гидрогеохимических данных, полученных в 2012 г., свидетель-

стует о прямой гидродинамической зональности в разрезе исследуемой площади, с которой коррелируют гидрогеохимические зоны пресных и солоноватых вод.

Подземные воды зоны активного водообмена Нарыкско-Осташкинской площади по составу гидрокарбонатные кальциевые и кальциево-натриевые (рис. 2). Содержание иона  $\text{HCO}_3^-$  изменяется от 0,32 до 0,58 г/л, но наиболее часто составляет 0,4 г/л,  $\text{Ca}^{2+}$  от 0,06 до 0,12 г/л,  $\text{Na}^+$  в среднем до 0,03 г/л, а концентрации  $\text{Cl}^-$  не превышает 0,024 г/л, в среднем составляет 0,006 г/л. С глубиной минерализация подземных вод увеличивается от 0,46 до 0,77 г/л. Одновременно с ростом минерализации растет и значение pH. Подземные воды в основном нейтральные, реже слабощелочные. Для подземных вод рассматриваемой площади наиболее характерны значения pH от 7,0 до 7,6.

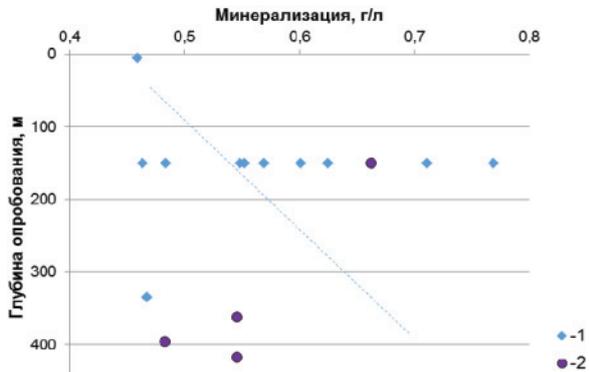


Рис. 2. Изменение минерализации подземных вод с глубиной в зоне активного водообмена. Типы вод по химическому составу: 1 –  $\text{HCO}_3^-$ -Ca; 2 –  $\text{HCO}_3^-$ -Ca-Na

Fig. 2. Change of groundwater salinity by depth in the zone of active water exchange. Types of water are shown according to its chemical composition: 1 –  $\text{HCO}_3^-$ -Ca; 2 –  $\text{HCO}_3^-$ -Ca-Na

Увеличение минерализации подземных вод происходит в основном за счет доли натрия в ионном составе. При этом, начиная с глубины порядка 350 м, наблюдаются воды гидрокарбонатного кальциево-натриевого состава. Таким образом, тип подземных вод меняется с гидрокарбонатного кальциевого на гидрокарбонатный кальциево-натриевый. Воды зоны активного водообмена в основном пресные, реже умеренно пресные.

Это объясняется тем, что с глубиной интенсивность водообмена снижается даже в пределах одной зоны, при этом возрастает время взаимодействия воды с горными породами, в результате чего в растворе происходит накопление элементов, что влечет за собой изменение их солености и щелочности.

Для зоны замедленного водообмена характерны достаточно сложные гидрогеохимические условия. Развитие этой зоны начинается с уменьшения распространения в разрезе продуктов выветривания и, как следствие, уменьшения интенсивности водообмена. В основном она заполнена гидрокарбонатными натриевыми (содовыми) водами.

По литературным данным известно, что в Кузбассе содовые воды развиты до глубины ~1 км. По нашим данным они развиты шире, чем представлялось, и мы находим их на глубинах до 2 км, например, на ранее изученной соседней Талдинской площади, Березовоярском участке, в Томь-Усинском районе. На территории Нарыкско-Осташкинской площади они встречаются до глубины 1 км, т. е. ниже данных по химическому опробованию пока нет.

Эти воды с минерализацией от 1 до 5–7 г/л (реже 0,5–0,8, 10–19 г/л) являются щелочными с pH от 8,0 (реже 7,5) до 10, уже в верхней части гидродинамической зоны переходящие в гидрокарбонатные натриево-кальциевые, кальциево-натриевые (рис. 3, 4).

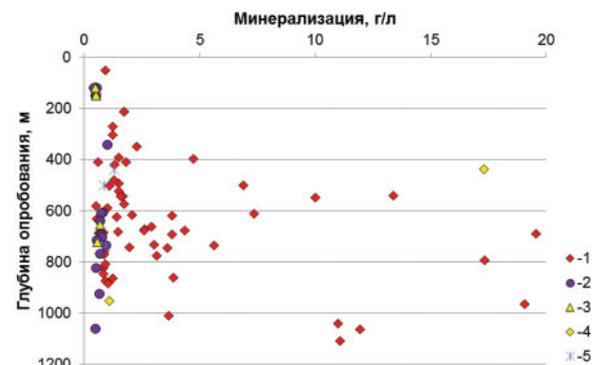


Рис. 3. Изменение минерализации вод зоны замедленного водообмена с глубиной. Типы вод по химическому составу: 1 –  $\text{HCO}_3^-$ -Na; 2 –  $\text{HCO}_3^-$ -Na-Ca; 3 –  $\text{HCO}_3^-$ -Ca-Na; 4 –  $\text{HCO}_3^-$ -Cl-Na; 5 –  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4^-$ -Na

Fig. 3. Change of water mineralization in the zone of slow water exchange by depth. Types of water are shown according to its chemical composition: 1 –  $\text{HCO}_3^-$ -Na; 2 –  $\text{HCO}_3^-$ -Na-Ca; 3 –  $\text{HCO}_3^-$ -Ca-Na; 4 –  $\text{HCO}_3^-$ -Cl-Na; 5 –  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{SO}_4^-$ -Na

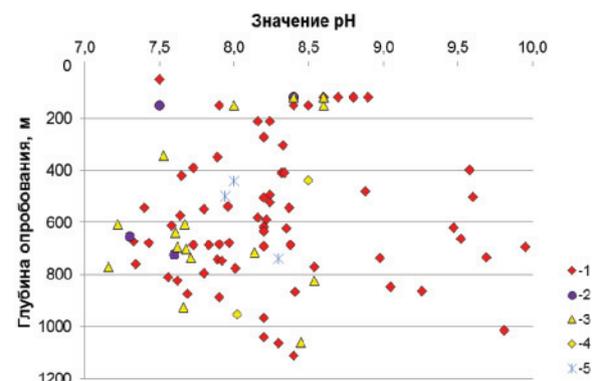


Рис. 4. Изменение значений pH вод зоны замедленного водообмена с глубиной. Типы вод по химическому составу: 1 –  $\text{HCO}_3^-$ -Na; 2 –  $\text{HCO}_3^-$ -Ca-Na; 3 –  $\text{HCO}_3^-$ -Na-Ca; 4 –  $\text{Cl-HCO}_3^-$ -Na; 5 –  $\text{SO}_4^-$ - $\text{HCO}_3^-$ -Na

Fig. 4. Change of water pH values in the zone of slow water exchange by depth. Types of water are shown according to its chemical composition: 1 –  $\text{HCO}_3^-$ -Na; 2 –  $\text{HCO}_3^-$ -Ca-Na; 3 –  $\text{HCO}_3^-$ -Na-Ca; 4 –  $\text{Cl-HCO}_3^-$ -Na; 5 –  $\text{SO}_4^-$ - $\text{HCO}_3^-$ -Na

Химический состав вод зоны замедленного водообмена определяется, в первую очередь, стадией взаимодействия воды с горными породами. Именно поэтому в ней увеличиваются, по сравнению с зоной активного водообмена, содержания  $\text{HCO}_3^-$  от 0,3 до 5,3 г/л реже до 12,2–13,1 г/л,  $\text{Na}^+$  до 5,6 г/л и  $\text{Cl}^-$  до 1,2, реже до 2,9 г/л, тогда как  $\text{Ca}^{2+}$  уменьшается до 0,01 г/л. Практически все опробованные воды являются солоноватыми с минерализацией до 10 г/л, иногда слабосолеными (до 19,6 г/л). В составе водорастворенного газа преобладает метан (объемная доля составляет 85–95 %).

Как уже было отмечено ранее, содовые воды в Кузбассе пользуются практически повсеместным распространением, начиная с глубин первых сотен метров [1–6, 9, 15]. При этом с глубиной содержание соды в них возрастает. Идентичную картину мы наблюдаем и на Нарыкско-Осташкинской площади (рис. 2, 3). Из приведенных рисунков видно, что с глубиной общая минерализация воды значительно возрастает. В основном этот рост обусловлен увеличением содержаний  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Na}^+$ , тогда как содержание сульфат-иона в большинстве анализов не превышает 10 мг/л (реже до 70 мг/л), а хлора-иона – первые десятки мг/л. В то же время содержание в таких пробах  $\text{HCO}_3^-$  намного выше и воды остаются гидрокарбонатными, реже – гидрокарбонатно-хлоридными, хлоридно-гидрокарбонатными и гидрокарбонатно-сульфатными.

Высокоминерализованные (слабосоленые) воды обогащены еще и рядом микрокомпонентов, например Sr, J, Br. Эти и ряд других микрокомпонентов отмечаются для гидрокарбонатных натриевых вод с минерализацией 10–19 г/л и хлоридных натриевых вод (до 17 г/л) зоны замедленного водообмена, но в более низких концентрациях, чем характерны для зоны весьма замедленного водообмена. Однако содержание Br вполне сопоставимо с его содержаниями, установленными в Абашевской глубокой скважине, где в подземных водах с минерализацией 32–35 г/л концентрация Br составляет 9,5 и 43,3 мг/л соответственно [7]. В связи с этим можно предположить, что эти воды относятся к самым «низам» зоны замедленного водообмена.

Таким образом, отмеченные изменения в минерализации и pH подземных вод носят естественный характер и подчиняются прямой вертикальной зональности, которая свидетельствует об инфильтрационном генезисе изученных вод, а источником их восполнения являются атмосферные осадки, которые инфильтруются в водоносные комплексы из областей питания. По мере поступления воды на большую глубину соленость ее, как мы установили выше, растет, т. е. состав и величина общей минерализации подземных вод обусловлены временем взаимодействия воды с горной породой: чем медленнее она движется, тем длиннее ее путь, и соответственно, чем глубже она просачивается, тем выше соленость. Следовательно, величина общей минерализации и состав подземных вод определяются временем взаимодействия в системе вода-порода

[4]. Доказательств наличия глубинной составляющей в изученных водах в настоящее время не получено, и говорить о подтоке или вскрытии более глубоких вод пока оснований нет. Приведенные выше анализы подтверждают ранее сделанный вывод о том, что в пределах рассматриваемой структуры (Талдинской и Нарыкско-Осташкинской площадей) развиты инфильтрационные подземные воды, области питания которых располагаются на местных и отдаленных геоморфологически возвышенных, высокопроницаемых участках.

#### Заключение

Результаты выполненных исследований позволяют уточнить некоторые особенности гидрогеологических условий Нарыкско-Осташкинской площади. Так, по результатам опытно-фильтрационных работ в устье реки Осиновка установлено наличие гидравлической связи подземных вод верхней гидродинамической зоны с поверхностными водоотками, а также определены значения коэффициентов водопроводимости и непроницаемости для этой части гидрогеологического разреза. На основе оценки взаимодействия подземных и поверхностных вод по результатам опытно-фильтрационных работ установлено наличие выраженного влияния граничных условий I и III рода на работу гидрогеологических скважин, что позволяет существенно актуализировать гидродинамические модели, которые могут быть использованы для обоснования добычи угольного метана в этом районе. Гидродинамическое опробование скважины у п. Чалток, в свою очередь, выявило этажное положение напорных подземных вод в толще пермских отложений при разнице уровней порядка 50 м и позволило определить фильтрационные характеристики двух опробованных толщ. Полученная информация уточняет ранее выдвигаемую рабочую гипотезу о единстве уровня подземных вод и тесной гидравлической связи всех водоносных зон в изучаемом районе. Созданы предпосылки для выделения относительно изолированных водоносных комплексов и горизонтов, по крайней мере в пределах распространения слаботрешиноватых массивов горных пород.

В целом гидродинамические условия Нарыкско-Осташкинской площади исследованы неравномерно как по площади, так и по глубине. В то же время общие закономерности строения центральной части Кузнецкого бассейна и распределения фильтрационных свойств пород в её пределах позволяют экстраполировать имеющиеся точечные данные на всю территорию исследуемой площади.

Данные гидрогеохимических опробований позволяют судить о корреляции гидродинамических и гидрогеохимических зон, что подтверждает зависимость состава подземных вод инфильтрационного генезиса от условий водообмена.

В изученном районе развиты разнообразные типы вод, которые подчиняются нормальной гидрогеохимической зональности, в соответствии с ко-

торой можно выделить две гидрогеохимические зоны: пресных и солоноватых вод. Зона пресных вод соответствует зоне активного водообмена, которая характеризуется более высокой проницаемостью отложений. К этой зоне приурочены воды нейтральные и слабощелочные, пресные, гидрокарбонатного кальциевого состава. Зона замедленного водообмена – меньшей проницаемостью и развитием содовых вод ( $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ) с минерализацией 0,5–19 г/л и рН от 7,5 до 9,9. В составе водорастворенного газа преобладает метан. Распространена зона замедленного водообмена на данной площади в основном в песчаных средне-верхнепермских отложениях, содержащих многочисленные угольные пласты.

В пределах зоны замедленного водообмена дополнительно можно выделить верхнюю и нижнюю части. Верхняя характеризуется наличием пресных или слабоминерализованных содовых вод (ми-

нерализация 0,5–5 г/л), с повышенными концентрациями  $\text{Cl}^-$  и иногда  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Нижняя часть зоны замедленного водообмена характеризуется наличием уже солоноватых и даже слабосоленых (минерализация до 19,6 г/л) содовых вод с повышенным содержанием  $\text{Cl}^-$ , а также таких микрокомпонентов, как Sr, J, Br. В составе водорастворенного газа продолжает накапливаться метан.

Рост минерализации вод с глубиной происходит в основном за счет ионов  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Na}^+$ , реже за счет  $\text{SO}_4^{2-}$  (только в верхней части зоны замедленного водообмена) и  $\text{Cl}^-$  ионов.

Выявленные закономерности изменения химического состав подземных вод по глубине подтверждают наличие двух гидродинамических зон в разрезе угленосной толщи и позволяют определять границу между ними с учетом выделенных типов подземных вод по химическому составу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нетрадиционные ресурсы метана угленосных толщ / Н.М. Стронский, В.Т. Хрюкин, Д.В. Митронов, Е.В. Швачко // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2008. – Т. ЛП. – № 6. – С. 63–72.
2. Кузнецкий бассейн – крупнейшая сырьевая база промышленной добычи метана из угольных пластов / А.М. Карасевич, В.Т. Хрюкин, Б.М. Зимаков, Н.Г. Матвиенко, С.С. Золотых, В.Г. Натура, Т.С. Попова. – М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. – 64 с.
3. Гридасов А.Г. Результаты гидродинамических исследований структурной скважины № СН-15 на Чалтокском участке работ по поиску угольного метана (Кузбасс) // Проблемы геологии и освоения недр: Труды XVIII Международного симпозиума им. академика М.А. Усова студентов и молодых ученых. Т. I. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – С. 442–444.
4. Грицюк Я.М., Кочеткова В.М. Морфогеохимическая томография угольных и углеметановых месторождений Кузбасса // Гидрогеология, инженерная гидрогеология и гидроэкология: Материалы конференции, посвященной 75 летию кафедры ГИГЭ. – Томск, 2005. – С. 51–58.
5. Домрочева Е.В. Гидрогеохимические особенности угольных районов юга Кузбасса: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2005. – 22 с.
6. Домрочева Е.В., Лепокурова О.Е., Сизиков Д.А. Геохимическая характеристика подземных вод Нарыкско-Осташкинской площади (Кузбасс) // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325. – № 1. – С. 94–101.
7. Домрочева Е.В., Шварцев С.Л. Геохимия содовых вод Ерунаковского района Кузбасса // Гидрогеология и карстование. – 2006. – Вып. 16. – С. 84–91.
8. Кусковский В.С., Кашеваров А.А., Рыбакова С.Т. Оценка запасов подземных вод инфильтрационных водозаборов (математическое моделирование). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. – 156 с.
9. Рогов Г.М., Попов В.К. Гидрогеология и катагенез пород Кузбасса. – Томск: Изд-во ТГУ, 1985. – 191 с.
10. Токаренко О.Г. Подземные воды центральной части Кузбасса: химический состав в пределах различных ландшафтных областей // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 1. – С. 169–174.
11. Покровский Д.С. К вопросу режима подземных вод Ерунаковского района Кузбасса // Известия Томского политехнического института. – 1967. – Т. 167. – С. 32–35.
12. Покровский Д.С., Плевако Г.А. Гидрогеохимические условия зоны пологих брахиструктур Кузбасса на примере Ерунаковского угленосного района // Известия Томского политехнического института. – 1975. – Т. 297. – С. 57–63.
13. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода–порода: в 5 т. Т. 2: Система вода–порода в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев, Б.Н. Рыженко, В.А. Алексеев, Е.М. Дутова, И.А. Кондратьева, Ю.Г. Копылова, О.Е. Лепокурова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 389 с.
14. Шварцев С.Л., Домрочева Е.В., Рассказов Н.М. Геохимия формирования содовых вод Кузбасса // Известия Томского Политехнического Университета. – 2001. – Т. 318. – № 1. – С. 128–134.
15. Гидрогеология Ерунаковского района Кузбасса в связи с проблемой добычи угольного метана / С.Л. Шварцев, В.Т. Хрюкин, Е.В. Домрочева, К.И. Кузеванов, Н.М. Рассказов, Т.С. Попова, О.Е. Лепокурова, Е.В. Швачко // Геология и геофизика. – 2006. – Вып. 47. – № 7. – С. 878–889.
16. Гридасов А.Г., Кузеванов К.И. Схематизация гидрогеологических условий на участках добычи угольного метана в Кузбассе для обоснования прогнозных гидродинамических расчетов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2017. – № 3 (121). – С. 12–21.
17. Gridasov A.G., Kuzevanov K.I., Bogdanova A.G. Hydrogeological condition patterns of Kuznetsk Basin coalbed methane fields for estimating hydrodynamic calculations // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 43. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012022/pdf> (дата обращения 20.04.2018).
18. Zhang X.L., Jing J.F., Hou Y.X., Liang B. Analysis on hydrogeology conditions of southern jingfang coal mine in Changzhi, Shanxi // Coal Geology of China– 2014. – V. 26. – P. 63–72.
19. Junliang G., Benjun L., Lai Y. Application of Water Chemistry and Isotope Analysis in the Coal Mine Hydrogeology Prospection // Hydrogeology. – 2014. – V. 1. – P. 38–45.
20. Post D. Impacts of Coal Seam Gas (Coal Bed Methane) Extraction on Water Resources in Australia // EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2017. – V. 19. – P. 10861–10867.
21. Sun W., Zhou W., Jiao J. Hydrogeological classification and water inrush accidents in China's coal mines // Mine Water and the Environment. – 2016. – V. 35. – № 2. – P. 214–220.
22. Niec M. Evaluation of coal resources for underground gasification in Poland. Selection of possible UCG sites // Fuel. – 2017. – V. 208. – P. 193–202.

23. Jian L.I. Hydrogeological Characteristics of Inner Mongolia Dongsheng Coal Mine of Hongjingta // Sichuan Building Materials. – 2016. – V. 6. – P. 86–97.
24. Hou G.C. Hydrogeology of the Ordos basin, China // Journal of Groundwater Science and Engineering. – 2017. – V. 5. – № 2. – P. 104–115.
25. Ge Y.Y. Characteristics of ion concentration in groundwater drainage from coalbed methane wells in Panzhuang of China // Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2014. – V. 19. – P. 3839–3849.
26. Yao Y., Liu D., Yan T. Geological and hydrogeological controls on the accumulation of coalbed methane in the Weibei field, southeastern Ordos Basin // International Journal of Coal Geology. – 2014. – V. 121. – P. 148–159.
27. Meredith E.B. Coal aquifer contribution to streams in the Powder River Basin, Montana // Journal of Hydrology. – 2016. – V. 537. – P. 130–137.
28. Owen D.D.R., Cox M.E. Hydrochemical evolution within a large alluvial groundwater resource overlying a shallow coal seam gas reservoir // Science of the Total Environment. – 2015. – V. 523. – P. 233–252.
29. Sherwood O.A. Groundwater methane in relation to oil and gas development and shallow coal seams in the Denver-Julesburg Basin of Colorado // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2016. – V. 113. – № 30. – P. 8391–8396.
30. Shvartsev S.L., Rasskazov N.M., Savichev O.G. Contents and migration forms of elements in natural waters of the mid-Tom' basin // Geologiya i Geofizika. – 1997. – V. 38. – P. 1955–1961.
31. Rasskazov N.M., Savichev O.G. Hydrogeochemical Conditions in Southeastern Western Siberia: the Evidence from the Tom River Basin // Environmental Geoscience. – 1999. – V. 2. – P. 120–129.

Поступила 01.06.2018 г.

#### Информация об авторах

**Домрочева Е.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Кузеванов К.И.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Гридасов А.Г.**, ассистент отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Сизиков Д.А.**, заведующий лабораторией ОАО «Газпром промгаз» Научно-технического центра «Освоения не-традиционных ресурсов углеводородов».

UDC 556.3, 556.314

## HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF NARYK-OSTASHKIN AREA IN ERUNAKOVO REGION IN KUZBASS

**Evgeniya V. Domrocheva<sup>1</sup>,**  
DomrochevaYV@ipgg.sbras.ru

**Konstantin I. Kuzevanov<sup>2</sup>,**  
kki@tpu.ru

**Alexander G. Gridasov<sup>2</sup>,**  
gridasov@tpu.ru

**Dmitry A. Sizikov<sup>3</sup>,**  
D.Sizikov@promgaz.gazprom.ru

<sup>1</sup> Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,  
4, Akademicheskij Avenue, Tomsk, 634055, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

<sup>3</sup> Scientific-technical center «Development of unconventional hydrocarbon resources»,  
6, Nametkin avenue, Moscow, 117420, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the necessity of studying groundwater composition and hydrodynamic conditions at Naryk-Ostashkin area of Kuzbass, promising for extraction of coal methane.

**The main aim** of the work is to characterize hydrodynamic conditions and hydrogeochemical features at Naryk-Ostashkin area, and to determine groundwater recharge and discharge conditions to provide base for hydrogeological generalization of coal bed methane mining perspective areas.

**The methods.** Chemical composition of groundwater and surface water was studied in the Problem research hydrogeochemical laboratory (TPU), registered in the system of analytical laboratories of Gosstandart of Russia. Traditional methods were used to conduct a complete chemical analysis. Processing of experimental-filtration works was performed by the standard graphic method of interim tracking the level with further graphic constructions and computations in the software package MS Office.

**The results** of the study allow clarifying some features of hydrogeological conditions of the Naryk-Ostashkin area. Thus, according to the results of experimental filtration work at the mouth of the river Osinovka, the authors have established the presence of hydraulic relation of groundwater of the upper hydrodynamic zone to the surface water currents, and determined the values of water supply and water level coefficients for this part of the hydrogeological section. Based on evaluation of underground and surface water interaction by the results of experimental filtration work, the real influence of boundary conditions of the I and III kind on hydrogeological well operation was established, that allows significantly updating the hydrodynamic models that can be used to justify the production of coal methane in this area. In addition, it was found out that within the massifs of slightly fractured rocks there are isolated pressure systems, the formation of which is caused by the presence of layers with low water supply in the section. The authors distinguished the zones of intensive and delayed water exchange by the nature of permeability in the hydrogeological section. Zones of fresh and brackish water correlate with hydrodynamical heterogeneity of rocks in hydrogeochemical relation.

### Key words:

Groundwater, Kuzbass, Naryk-Ostashkin area, chemical composition, water genesis, hydrodynamic conditions

### REFERENCES

1. Storonskiy N.M., Khryukin V.T., Mitronov D.V., Shvachko E.V. Unconventional resources of coal bed methane. *Rus. chem. Journal*, 2008, vol. LII, no. 6, pp. 63–72. In Rus.
2. Karasevich A.M., Khryukin V.T., Zimakov B.M., Matvienko N.G., Zolotyh S.S., Natura V.G., Popova T.S. *Kuznetsky bassein – krupneyshaya syryevaya baza dobychi metana iz ugolnykh plastov* [Kuznetsk Basin is the largest base for methane extraction from coal seams]. Moscow, Mining Sciences Academy Publ. house, 2001. 64 p.
3. Gridasov A.G. Rezultaty gidroinamicheskikh issledovaniy strukturnoy skvazhiny № SN-15 na Chaltokskom uchastke rabot po posku ugolnogo metana (Kuzbass) [Results of hydrodynamic investigations of structural well № SN-15 at Chalovsk area for searching for coal methane (Kuzbass)]. *Problemy geologii i osvoeniya nedr. Trudy XVIII Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchennykh* [Problems of geology and exploration. Proc. Of the XVIII International simposium named after academician M.A. Usov of students and young scientists]. Tomsk, TPU Publ. house, 2014. Vol. I, pp. 442–444.
4. Gritsyuk Ya.M., Kochetkova V.M. Morfogeodinamicheskaya tomografiya ugolnykh i uglemetanovykh mestorozhdeniy Kuzbassa [Morphogeodynamic tomography of coal and coal-methane fields in Kuzbass]. *Gidrogeologiya, inzhenernaya gidrogeologiya i gidroekologiya. Materialy konferentsii, posvyashchennoy 75 letiyu kafedry GIGE* [Hydrogeology, engineering hydrogeology and hydroecology. Proc. of the conference devoted to the 75<sup>th</sup> anniversary of GIGE department]. Tomsk, 2005. pp. 51–58.
5. Domrocheva E.V. *Gidrogeokhimicheskie osobennosti ugolnykh rayonov yuga Kuzbassa*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Hydroge-

- ochemical features of coal regions of Kuzbass coal. Cand. Dis. Abstract]. Tomsk, 2005. 22 p.
6. Domrocheva E.V., Lepokurova O.E., Sizikov D.A. Geochemical characterization of underground water of the Narynsko-Ostashkinskaya area (Kuzbass). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 1, pp. 94–101. In Rus.
  7. Domrocheva E.V., Shvartsev S.L. Geokhimiya sodovyykh vod Erunakovskogo rayona Kuzbassa [Geochemistry of soda water of Erunakovskiy region in Kuzbass]. *Gidrogeologiya i karstovedenie*, 2006, Iss. 16, pp. 84–91.
  8. Kuskovsky V.S., Kashevarov A.A., Rybakova S.T. *Otsenka zapasov podzemnykh vod infiltratsionnykh vodozaborov (matematicheskoe modelirovanie)* [Assessment of underground water resource in infiltration water supply inlet]. Novosibirsk, SO RAN Press, 2004. 156 p.
  9. Rogov G.M., Popov V.K. *Gidrogeologiya i katagenez porod Kuzbassa* [Hydrogeology and katagenezis of Kuzbass rocks]. Tomsk, TGU Press, 1985. 191 p.
  10. Tokarenko O.G. Ground waters of Kuzbas central part: chemical composition within various landscape regions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 321, no. 1, pp. 169–174. In Rus.
  11. Pokrovsky D.S. K voprosu rezhima podzemnykh vod Erunakovskogo rayona Kuzbassa [On the issue of underground water mode in Erunakovskiy region in Kuzbas]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*, 1967, vol. 167, pp. 32–35.
  12. Pokrovskiy D.S., Plevako G.A. Gidrogeokhimicheskie usloviya zony pologikh brakhistruktur Kuzbassa na primere Erunakovskogo uglenosnogo rayona [Hydrogeochemical conditions of the flat brachistructures area in Kuzbass coal-bearing region]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*, 1975, vol. 297, pp. 57–63.
  13. Shvartsev S.L., Ryzhenko B.N., Alekseev V.A., Dutova E.M., Kondrateva I.A., Kopylova Yu.G., Lepokurova O.E. *Geologicheskaya evolyutsiya i samoorganizatsiya sistemy voda–poroda. T. 2. Sistema voda–poroda v usloviyakh zony gipergeneza* [Geological evolution and self-organization of water–rock system. Vol. 2. Water–rock system in hypergenesis]. Novosibirsk, SO RAN Press, 2007. 389 p.
  14. Shvartsev S.L., Domrocheva E.V., Rasskazov N.M. Geochemistry and formation of Kuzbass soda waters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2001, vol. 318, no. 1, pp. 128–134. In Rus.
  15. Shvartsev S.L., Khryukin V.T., Domrocheva E.V., Kuzevanov K.I., Passkazov N.M., Popova T.S., Lepokurova O.E., Shvachko E.V. Gidrogeologiya Erunakovskogo rayona Kuzbassa v svyazi s problemoy dobychi ugolnogo metana [Hydrogeology of the Erunakovskiy area of the Kuznetsk basin in the context of the problem of coal methane formation and mining]. *Geologiya i geofizika*, 2006, vol. 47, pp. 878–889.
  16. Gridasov A.G., Kuzevanov K.I. Generalisation of hydrogeological conditions at coalbed methane fields in the Kuznetsk coal basin for prediction hydrodynamic calculations. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, no. 3, pp. 12–21. In Rus.
  17. Gridasov A.G., Kuzevanov K.I., Bogdanova A.G. Hydrogeological condition patterns of Kuznetsk Basin coalbed methane fields for estimating hydrodynamic calculations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 43. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/43/1/012022/pdf> (accessed 20 April 2018).
  18. Zhang X.L., Jing J.F., Hou Y.X., Liang B. Analysis on hydrogeology conditions of southern jingfang coal mine in Changzhi, Shanxi. *Coal Geology of China*, 2014, vol. 26, pp. 63–72.
  19. Junliang G., Benjun L., Lai Y. Application of Water Chemistry and Isotope Analysis in the Coal Mine Hydrogeology Prospection. *Hydrogeology*, 2014, vol. 1, pp. 38–45.
  20. Post D. Impacts of Coal Seam Gas (Coal Bed Methane) Extraction on Water Resources in Australia. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2017, vol. 19, pp. 10861–10867.
  21. Sun W., Zhou W., Jiao J. Hydrogeological classification and water inrush accidents in China's coal mines. *Mine Water and the Environment*, 2016, vol. 35, no. 2, pp. 214–220.
  22. Niec M. Evaluation of coal resources for underground gasification in Poland. Selection of possible UCG sites. *Fuel*, 2017, vol. 208, pp. 193–202.
  23. Jian L.I. Hydrogeological Characteristics of Inner Mongolia Dongsheng Coal Mine of Hongjingta. *Sichuan Building Materials*, 2016, vol. 6, pp. 86–97.
  24. Hou G.C. Hydrogeology of the Ordos basin, China. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2017, vol. 5, no. 2, pp. 104–115.
  25. Ge Y.Y. Characteristics of ion concentration in groundwater drainage from coalbed methane wells in Panzhuang of China. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, vol. 19, pp. 3839–3849.
  26. Yao Y., Liu D., Yan T. Geological and hydrogeological controls on the accumulation of coalbed methane in the Weibei field, southeastern Ordos Basin. *International Journal of Coal Geology*, 2014, vol. 121, pp. 148–159.
  27. Meredith E.B. Coal aquifer contribution to streams in the Powder River Basin, Montana. *Journal of Hydrology*, 2016, vol. 537, pp. 130–137.
  28. Owen D.D.R., Cox M.E. Hydrochemical evolution within a large alluvial groundwater resource overlying a shallow coal seam gas reservoir. *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 523, pp. 233–252.
  29. Sherwood O.A. Groundwater methane in relation to oil and gas development and shallow coal seams in the Denver–Julesburg Basin of Colorado. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, vol. 113, no. 30, pp. 8391–8396.
  30. Shvartsev S.L., Rasskazov N.M., Savichev O.G. Contents and migration forms of elements in natural waters of the mid-Tom' basin. *Geologiya i Geofizika*, 1997, vol. 38, pp. 1955–1961.
  31. Rasskazov N.M., Savichev O.G. Hydrogeochemical Conditions in Southeastern Western Siberia: the Evidence from the Tom River Basin. *Environmental Geoscience*, 1999, vol. 2, pp. 120–129.

Received: 1 June 2018.

#### Information about the authors

**Evgeniya V. Domrocheva**, Cand. Sc., researcher, Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Konstantin I. Kuzevanov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander G. Gridasov**, assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Dmitry A. Sizikov**, head of the laboratory, Scientific-technical center «Development of unconventional hydrocarbon resources».

УДК 556.3; 551.4

## УХУДШЕНИЕ СИТУАЦИИ С ПОДТОПЛЕНИЕМ, СВЯЗАННОЕ С АНТРОПОГЕННЫМ ВЛИЯНИЕМ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ТЮКАЛИНСКА

Медведков Кирилл Станиславович<sup>1,2</sup>,  
kmedvedkov@mail.ru

Штриплинг Лев Оттович<sup>2</sup>,  
los@omgtu.ru

<sup>1</sup> АО «Омская геологоразведочная экспедиция»,  
Россия, 644007, г. Омск, ул. Гусарова, 16.

<sup>2</sup> Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

**Актуальность** работы обусловлена увеличением влияния антропогенного фактора в развитии процессов подтопления освоенных территорий. В последние годы в Омской области подтоплению подвергается большое количество населенных пунктов, в том числе и местности с благополучными в целом условиями. Одним из таких населенных пунктов является город Тюкалинск, где проблема подтопления серьезно ощущалась в последние четыре года, что и повлияло на выбор объекта исследования.

**Цель работы:** выявление причин обострения ситуации с подтоплением, поиск решений по стабилизации проблемы с учетом влияния реки, осуществляющей естественный дренаж территории.

**Методы исследования:** анализ многолетних наблюдений за подземными водами на скважинах режимной сети мониторинга состояния недр с учетом количества выпавших осадков, выявление причинно-следственных связей с использованием графоаналитических зависимостей.

**Результаты.** Проанализированы многолетние изменения уровня подземных вод, разгрузка которых осуществляется в реку Тюкалка. Изучена интенсивность выпавших осадков на данной территории за периоды обследований. Выявлены причины медленного ухода талых вод весной и накопления подземных вод в многолетний период. Несмотря на достаточно высокую упругость приходно-расходного баланса (атмосферные осадки – поверхностные – подземные воды) и высокую способность к отводу избыточной воды за счет транзитной (пересекающей город) реки Тюкалка, многочисленные антропогенные сооружения, такие как: водопроводящие трубы, плотины, насыпные мосты, дороги и мн. др., вносят существенный вклад в естественный дренаж, понижая расходную часть водного баланса. Регулирование стока реки приводит к ухудшению отвода как поверхностных, так и подземных вод, увеличивая риски развития подтопления и продолжительность весеннего половодья.

### Ключевые слова:

Подземные воды, антропогенное влияние, разгрузка, подтопление, половодье, режим, скважина, наблюдения, уровень подземных вод, поверхностные воды, атмосферные осадки.

Город Тюкалинск – административный центр Тюкалинского района Омской области, расположенный на востоке Ишимской равнины на реке Тюкалка, в 124 км к северо-западу от областного центра – города Омска.

К настоящему моменту население города составляет порядка 11,2 тысяч человек [1]. В последнее время (с 2013 г.) одной из проблем местных жителей является подтопление территории, приуроченное к весеннему половодью. Несмотря на то, что населенный пункт обеспечен естественным дренажем в виде реки Тюкалка, она не успевает отводить большой объем воды, а талые и подземные воды приводят к подтоплению обширных территорий города и окрестностей. Пик половодья приходится на второй квартал (с апреля по июнь). Для оценки ситуации и возможных причин возникновения столь сильного половодья и приуроченного к нему подтопления (в последние годы) авторами были использованы материалы, полученные в ходе исследования реки, данные по количеству выпадающих осадков и режимным наблюдениям по скважине № 275. Скважина № 275, данные по которой фиксируются ТЦ ГМСН (АО «ОГРЭ»), нахо-

дится в районе метеостанции города и оборудована фильтром в водоносных слоях верхнего миоцена (7,8–15,7 м) (рис. 1), в 1,5 км на северо-запад от нее протекает река Тюкалка.

Режим подземных вод исследуемой местности относится к приречному (прибрежному), что характеризует тесную гидродинамическую связь системы «поверхностные – подземные воды», вызывающая существенные отклонения в водном балансе, при изменении приходной или расходной части в одной или другой составляющей «системы». При этом фиксация уровня подземных вод (более инертной составляющей системы) с учетом количества выпадающих осадков позволяет оценивать изменения в водном балансе и строить прогнозы его изменения.

С учетом сказанного выше, были проанализированы колебания уровня подземных вод за весь период с начала режимных наблюдений. Важность данных, получаемых в ходе режимных наблюдений по скважинам, широко отражена во многих литературных источниках [2–8]. Данные о поведении уровня подземных вод приведены на графике (рис. 2).



Масштаб 1:25 000

**Рис. 1.** Гидрогеологическая скважина № 275, оборудованная на первый от поверхности водоносный горизонт

**Fig. 1.** Hydrogeological well no. 275, equipped at the first aquifer from the surface

Как видно из графика, имеется практически циклическая зависимость (уровень–дата) с повторяющимися пиками минимума и максимума, которая характеризуется близкой к горизонтальной линией тренда (прямолинейная линия тренда построена средствами электронных таблиц Excel). Также стоит отметить, что правая часть графика (с 2012 г.) выходит за рамки привычного колебания уровня и достаточно «круто» устремляется вверх, что может говорить о накоплении подземных вод в поровом пространстве водоносного горизонта и подъеме уровня подземных вод к поверхности, обусловленном уменьшением расхода подземных вод или увеличением приходной части водного баланса.

Рассматривая данные о положении уровня воды в реке (03.09.14 и 02.06.15) в сопоставлении с уровнями подземных вод за аналогичные даты в скважине № 275 (рис. 3), можно заметить, что в реке уровень ниже на 1,27 и 1,88 м (09.14 и

06.15 соответственно). А максимальный уровень, характерный для половодья, будет около 113 м (в Балтийской системе высот, для 1 % обеспеченности), что практически исключает подпитку «подземных вод наблюдательной скважины» речными водами. Кроме того, полученные уровни воды и ярко выраженная сезонность колебаний уровней в скважине (максимумы характерны для времени весеннего снеготаяния и выпадения обильных осадков) дополнительно подтверждают наличие подземного питания реки Тюкалка, тесную связь подземных и поверхностных вод на исследуемом участке. Следует отметить, что геологическое описание пород, вскрытых скважиной № 275, приведено схематично, в виду отсутствия первичных материалов, буровых журналов и подробной документации по данной скважине. Фильтр скважины № 275 оборудован в водоносных слоях верхнего миоцена (7,8–15,7 м), представленных прос-

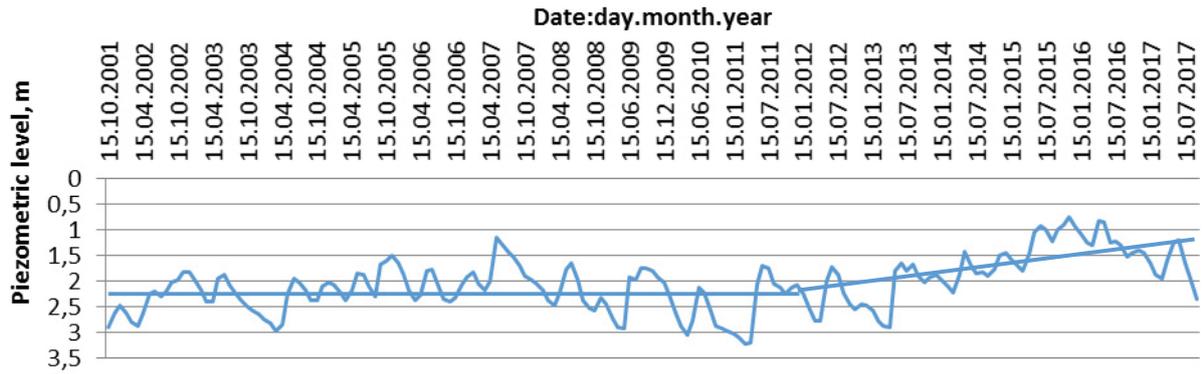


Рис. 2. Изменение уровня подземных вод в скважине № 275 (за весь период наблюдений)

Fig. 2. Fluctuations in groundwater level of well no. 275 (for the entire period of observation)

лаиванием суглинка с песком, рабочая часть его располагается в интервале 10,4–12,7 м. Кровля водоносного горизонта представлена преимущественно суглинками. Ввиду того, что расстояние между наблюдательной скважиной и рекой составляет 1,5 км, представленный поперечный разрез ограничен лишь профилем реки и разрезом непосредственно по скважине с соблюдением вертикального масштаба высот согласно шкале.

Учитывая данные по абсолютным отметкам Балтийской системы высот для района расположения скважины – это порядка 114 м, и в районе жилой застройки вблизи реки Тюкалка (в сторону которой происходит разгрузка подземных вод) – это около 113 м, можно сказать, что наблюдатель-

ная скважина служит индикатором риска подтопления города. При повышении уровня в скважине до отметки менее 1 м (более 113 м по абсолютным отметкам) с учетом уклона пьезометрической поверхности в сторону реки (около 0,001) происходит опасная ситуация, при которой могут подтапливаться как подземные, так и надземные сооружения. В период половодья ситуация приближается к критической за счет уменьшения стока подземных вод в реку и инфильтрации поверхностных вод, приводящих к стремительному повышению уровня подземных (в том числе и грунтовых) вод, – в следствии чего подтоплению могут подвергаться значительные по площади территории города.

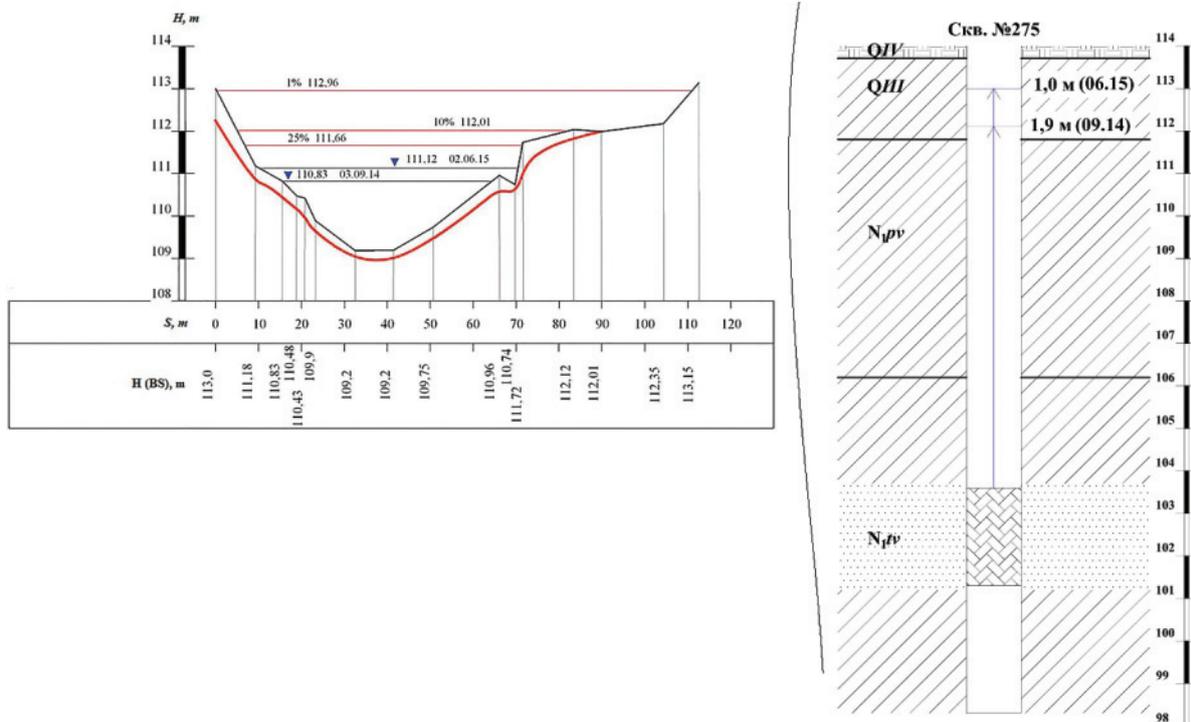


Рис. 3. Поперечный разрез по реке Тюкалка и скважине № 275

Fig. 3. Cross-section along the Tyukalka River and well no. 275

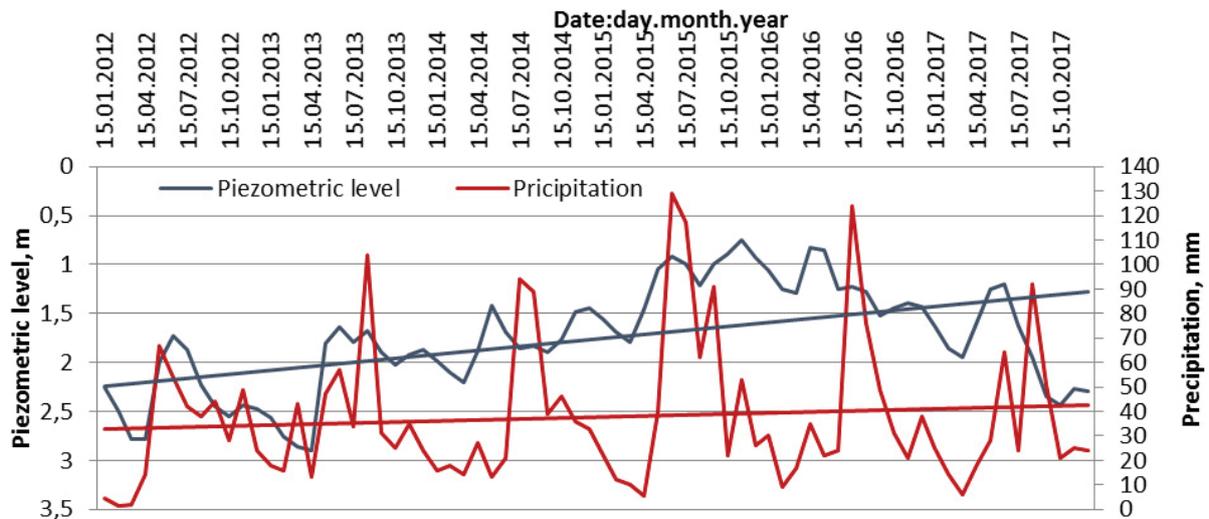


Рис. 4. Количество осадков и изменение уровня подземных вод в скважине № 275 (с 2012 г.)

Fig. 4. Precipitation and fluctuations in the level of groundwater of the well no. 275 (from 2012)

Необходимо отметить, что в целом в городе Тюкалинск отмечалась довольно стабильная ситуация, связанная с развитием процессов подтопления, которые если и были, то носили локальный и кратковременный характер. График на рис. 2 показывает, что уровень подземных вод в наблюдательной скважине не поднимался выше 1,5 м (за двумя редкими исключениями) до 2012 г. С 2012 г. начинается стабильный подъем уровня, который в 2015–2016 гг. стабильно превышал отметку в 1 м, что параллельно сопровождалось подтоплением городской территории.

Для более детального анализа повышения уровня подземных вод с начала 2012 г. были проанализированы данные по уровням совместно с количеством выпавших осадков [9] за одинаковые промежутки времени. Построен график, охватывающий по времени последние 6 лет наблюдений (рис. 4).

Как видно из графика, за последние шесть лет в уровне подземных вод произошли значительные изменения. Так, линия тренда в начале периода наблюдений (рис. 4) характеризуется уровнем в 2,25 м от земли, но к концу 2017 г. приближается к отметке 1,25 м (без учета понижения уровня воды в скважине начиная с 2016 г.). В то же время линия тренда суммы выпавших за месяц осадков показывает рост с 32 до 42 мм, что несопоставимо с величиной подъема уровня подземных вод. Расчеты показывают, что при пористости водовмещающих пород, равной 0,1, увеличение осадков на 10 мм не должно привести к повышению уровня подземных вод более чем на 100 мм. Отсюда следует, что существенные изменения в водном балансе не могут произойти только за счет увеличения интенсивности атмосферных осадков.

С учетом того, что существенная часть подземных вод (первых от поверхности водоносных горизонтов) разгружается в транзитную для города ре-

ку Тюкалка, тенденция к повышению уровня подземных вод может быть связана с уменьшением пропускающей способности водотока, связанного с наличием на реке множества инженерных сооружений IV класса [10], напрямую влияющих на скорость течения и объем транзита воды.

Река Тюкалка относится к водоток с весенне-летним половодьем и дождевыми паводками в теплое время года. В питании реки участвуют талые воды сезонных снегов, жидкие атмосферные осадки и подземные воды. Главным источником питания являются твердые атмосферные осадки, основная фаза водного режима представлена весенне-летним половодьем. Весенний подъем уровня начинается в середине–конце апреля. Наивысшие уровни наблюдаются в конце апреля – начале мая. В период половодья проходит 60–80 % годового стока. Летне-осенняя межень наступает к концу июня. Выпадающие осадки обуславливают некоторый подъем уровней, дождевые паводки не характерны, лишь в многоводные годы они составляют примерно 30 % стока во время весеннего паводка. В маловодные годы река в верховье пересыхает. Зимняя межень устанавливается с середины октября. Это самый продолжительный и маловодный период водного режима [11].

С учетом вышесказанного можно сделать вывод, что основное воздействие на подтопление территории города Тюкалинск в апреле–мае оказывают талые воды, с транзитом которых не справляется река Тюкалка. Кроме этого, как уже было отмечено выше, во время половодья снижается объем разгрузки подземных вод в реку (уменьшается гидравлический уклон потока подземных вод), что приводит к подъему уровня подземных вод и дополнительно способствует подтоплению территории Тюкалинска. Кроме того, график (рис. 4) показывает, что на протяжении 2015–2016 гг. повы-



**Рис. 5.** Грунтовая плотина на р. Тюкалка и водопропускные трубы через автомагистраль по состоянию на 2014 г. (слева – июль 2014 г., справа – сентябрь 2014 г.)

**Fig. 5.** Soil dam on the river Tyukalka and culverts across the highway (on the left – July 2014, on the right – September 2014)

шенные уровни подземных вод наблюдались и в несвойственные для половодья периоды времени. Все это может говорить о том, что изменился естественный режим разгрузки подземных вод, и причины нужно искать в антропогенном воздействии на условия поверхностного и подземного стока.

Основные проблемы с активным проявлением процессов подтопления вблизи города Тюкалинска возникли с 2013 г. [12–14].

Специалистами АО «ОГРЭ» в 2014–2015 гг. проведены наблюдения на реке Тюкалка, которые позволили выявить многочисленные рукотворные

сооружения, препятствующие естественному стоку реки. Часть из них и вовсе не позволяла воде пройти (рис. 5).

Как видно из рисунка, путь реке преграждает грунтовая плотина, не дающая воде продолжить свой путь по руслу. Данное сооружение снижает не только пропускную способность реки, скорость которой на момент обследования практически отсутствует, но и воздействует на естественный сток подземных вод, снижая расходную часть баланса.

Анализ данных космических снимков сверхвысокого разрешения в районе пересечения трассы



**Рис. 6.** Грунтовая плотина на р. Тюкалка и водопропускные трубы через автомагистраль по состоянию на июль 2015 г.

**Fig. 6.** Soil dam on the river Tyukalka and culverts across the highway (July 2015)

Тюмень–Омск рекой Тюкалка показывает, что течение реки «прерывалось» искусственной дамбой и ранее – 10.08.2012 и 17(22).08.2013.

В июле 2015 г. при повторном обследовании было обнаружено, что дамба вскрыта, река имеет течение 0,5 м/с (рис. 6).

Влияние восстановления движения водного потока реки можно проследить на примере графиков изменения уровней подземных вод, с учетом выбора интервалов с июня по октябрь (периоды максимального водообмена, атмосферные осадки-поверхностные-подземные воды без учета сезона половодья), когда река полностью справляется с потоком поступающих вод и полноценно выполняет роль естественной дрены (рис. 7).

Питание реки в выбранные месяцы в основном происходит за счет разгрузки подземных вод и выпадающих атмосферных осадков. Данные, представленные на графике (рис. 7), позволяют сделать вывод о восстановлении разгрузки ближе к концу 2015 г. (рис. 4, 7) при снижении общего уровня подземных вод в районе города Тюкалинск, что может быть связано со вскрытием дамбы, которая затрудняла путь реке еще с 2012 г.

Очевидно, что тесная взаимосвязь подземных вод и поверхностного стока реки оказывает существенное влияние на формирование подтопления в городе. Учитывая то, что через русло р. Тюкалки оборудовано множество переездов с дренажными устройствами, так или иначе влияющими на течение реки, – данные сооружения оказывают влияние и на подземные воды, разгрузка которых затрудняется и происходит их накапливание с дальнейшим повышением уровня. Тренд, показывающий их рост, отчетливо прослеживается начиная с 2012 г. Влияние гидротехнических сооружений на ситуацию с подтоплениями отмечено многими авторами [15, 16].

В соответствии с СП 11–105–97 часть II, подтопление в городе Тюкалинск развивается вслед-

ствие подъема уровня первого от поверхности водоносного горизонта, который испытывает существенные сезонные и многолетние колебания [17]. Подтопление усугубляется весенним половодьем, снижающим интенсивность разгрузки подземных вод и приводящим к увеличению их уровня, что и происходит в период с мая по июнь (рис. 2).

На основании данного утверждения, в соответствии с постановлением правительства Российской Федерации № 360 от 18 апреля 2014 г. «Об определении границ зон затопления, подтопления», район расположения наблюдательной скважины № 275 и существенную часть города Тюкалинска можно отнести к территории умеренного подтопления – при глубине залегания подземных вод до 2 м от поверхности [18].

Для уменьшения рисков подтопления в городе Тюкалинск необходимы меры по регулированию течения реки Тюкалка, которые бы способствовали транзиту больших масс воды во время весеннего половодья и осуществляли естественный дренаж подземных вод первых от поверхности водоносных горизонтов, снижая риск развития процессов подтопления. Ключевая роль дренажа в ситуации с увеличением уровня подземных вод отмечается во многих литературных источниках [19–21].

#### Выводы

Рассматривая полученные данные по гидрогеологической скважине № 275, оборудованной на подземные воды верхнего миоцена вблизи города Тюкалинска, и материалы по обследованию р. Тюкалка с учетом интенсивности атмосферных осадков, можно прийти к следующим заключениям:

1. Наличие многолетних наблюдений за подземными водами с учетом данных по сумме атмосферных осадков позволяет выявлять зависимости пригодно-расходных составляющих водного баланса, естественные природные колебания с сезонными пиками и спадами, тренд хода уровня

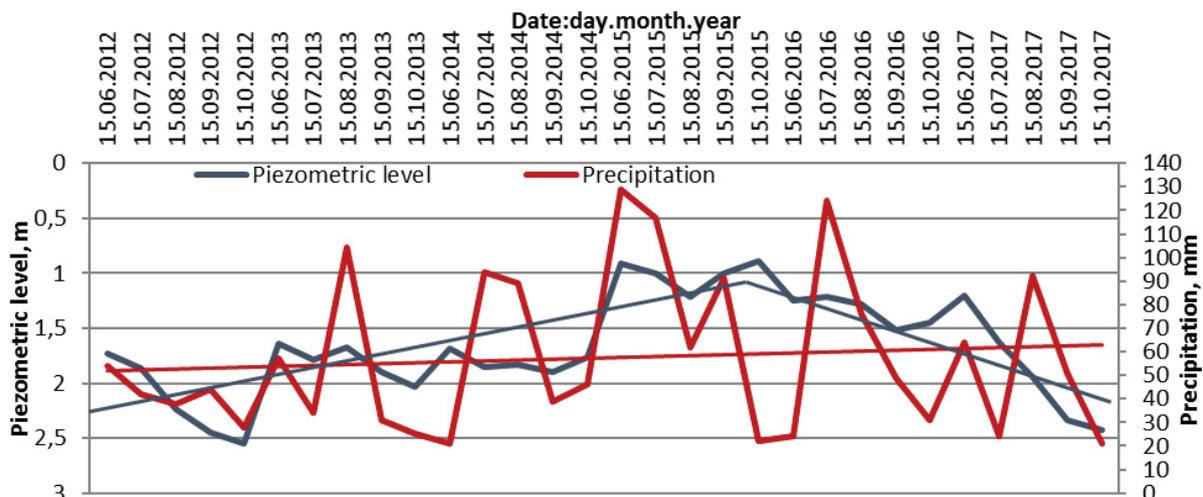


Рис. 7. Количество осадков и изменение уровня подземных вод скважины № 275 (за июнь–октябрь начиная с 2012 г.)

Fig. 7. Precipitation and fluctuations in the level of groundwater of the well no. 275 (June–October since 2012)

- подземных вод и давать общую оценку ситуации на локальных участках, приводящих к развитию процессов техногенного подтопления. Мониторинг подземных вод является важным инструментом, позволяющим определять степень риска потенциальной подтопляемости территории.
2. Выявление аномальных отклонений колебания уровня подземных вод (время смены направления линии тренда) без существенного изменения уровня атмосферных осадков позволяет определять причины данных отклонений, анализ которых дает возможность обосновать проектирование природоохранных мероприятий. Так, анализируя многолетние наблюдения за уровнем воды в скважине № 275, можно отметить:
- активизация подтопления (в первую очередь во время весеннего половодья) в районе города Тюкалинск с большой долей вероятности связана с наличием на реке Тюкалка большого количества инженерных сооружений, препятствующих естественному стоку и влияющих на водный баланс;

- увеличение риска подтопления в последние годы происходит и в несвойственные для населенного пункта летне-осенние периоды, что связано с общим повышением уровня подземных вод;
- высока вероятность того, что в последние годы подтопление развивается из-за наличия на пересечении с трассой Тюмень–Омск плотины у реки Тюкалка;
- анализ данных по количеству атмосферных осадков подтвердил их минимальный вклад в повышение уровня подземных вод за последние годы;
- отсутствие должных усилий по налаживанию дренажной системы города Тюкалинска и грамотного регулирования стока реки Тюкалка может привести к появлению глобальной проблемы с половодьем (в том числе и с летне-осенними паводками) и подтоплением территории в целом, что ранее было практически не свойственно территории данного населенного пункта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2016 года. – М.: Росстат, 2017. – 584 с.
2. Korbil K.L., Hose G.C. The weighted groundwater health index: Improving the monitoring and management of groundwater resources // *Ecological Indicators*. – April 2017. – V. 75. – P. 164–181. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.039> (дата обращения: 11.01.2017).
3. Assessment of trends in groundwater levels across the United States / Tess Russo, Upmanu Lall, Hui Wen, M. Williams // *Columbia Water Center White Paper*. March 2014. URL: [http://water.columbia.edu/files/2014/03/USGW\\_WhitePaper\\_FINAL.pdf](http://water.columbia.edu/files/2014/03/USGW_WhitePaper_FINAL.pdf) (дата обращения: 11.01.2017).
4. Miller C., Mork L. Whychus Creek Restoration Project at Camp Polk Preserve. 2014 Groundwater Monitoring Report. Upper Deschutes Watershed Council Bend, Oregon November, 2014. URL: <http://www.upperdeschuteswatershedcouncil.org/wp-content/uploads/2013/08/20141106-CP-Groundwater-Monitoring-Report-FINAL.pdf> (дата обращения: 11.01.2017).
5. Chapter 6. Groundwater responses due to various MAR structures: Case studies from Chennai, Tamil Nadu, India / Raicy Mani Christy, Parimalarenganayaki Sundaram, Thirunavukkarasu Munuswamy, Thomas Lutz, Michael Schneider and Lakshmanan Elango // *Natural Water Treatment Systems for Safe and Sustainable Water Supply in the Indian Context*. 2015. – P. 99–112. URL: [https://zenodo.org/record/61088/files/9781780408392\\_6.pdf](https://zenodo.org/record/61088/files/9781780408392_6.pdf) (дата обращения: 05.02.2017).
6. Investigation of rootzone salinity with field monitoring system at tsunami affected rice fields in Miyagi, Japan / Ieyasu Tokumoto, Katsumi Chiba, Masaru Mizoguchi, Hideki Miyamoto // *Manuscript under review for journal SOIL*. Published: 18 March 2016. URL: <http://www.soil-discuss.net/soil-2016-12/soil-2016-12.pdf> (дата обращения: 05.02.2017).
7. Roberts R. HydroResolutions, LLC. East Torrance Soil and Water Conservation District. Evaluation of Groundwater Level Data from Estancia Basin. January 2012. URL: [http://ebwpc.org/PDFS/Evaluation\\_of\\_Groundwater\\_Level\\_Data\\_from\\_Estancia\\_Basin\\_Monitoring\\_Wells.pdf](http://ebwpc.org/PDFS/Evaluation_of_Groundwater_Level_Data_from_Estancia_Basin_Monitoring_Wells.pdf) (дата обращения: 11.01.2017).
8. Янкович Е.П., Янкович А.С. Информационная среда для эколого-геохимической оценки состояния подземной гидросферы // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2012. – № 3. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnaya-sreda-dlya-ekologo-geohimicheskoy-otsenki-sostoyaniya-podzemnoy-gidrosfery> (дата обращения: 20.01.2017).
9. Архив погоды в Тюкалинске. URL: [https://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Тюкалинске](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Тюкалинске) (дата обращения: 21.06.2018).
10. СНиП 33–01–2003. Гидротехнические сооружения. – М.: Госстрой России, 2004. – 28 с.
11. Кузнецов М.Ю. и др. Отчет по объекту: «Проведение мониторинговых исследований дна и берегов реки Тюкалка Тюкалинского муниципального района от оз. Разлив до оз. Кошара». – Омск, АО «ОГРЭ», 2015. – 156 с.
12. Подтопление – процесс управляемый // *Тюкалинский вестник*. – 6 сентября 2013. – № 36. URL: <http://tukalinsk.ru/View.asp?objType=2&objValue=76760&rnd=02645776053116853> (дата обращения: 15.10.2016).
13. Лосева Л. Когда весна не в радость // *Тюкалинский вестник*. – 15 апрель 2016. – № 15. URL: <http://tukalinsk.ru/View.asp?objType=2&objValue=87947&rnd=07209831701924043> (дата обращения: 15.10.2016).
14. Лосева Л. Ситуация под контролем власти // *Тюкалинский вестник*. – 22 апреля 2016. – № 16. URL: <http://tukalinsk.ru/View.asp?objType=2&objValue=88017&rnd=07548072539927448> (дата обращения: 15.10.2016).
15. Разумова Н.В., Разумов В.В., Молчанов Э.Н. Переувлажнение и подтопление почв и земель в Центральном регионе России // *Бюл. Почв. ин-та*. – 2016. – № 82. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/pereuvlazhnenie-i-podtoplenie-pochv-i-zemel-v-tsentralnom-regione-rossii> (дата обращения: 20.01.2017).
16. Esenov P.E., Starodubtsev V.M. Changes in soil-ameliorative conditions of the Tejen river delta. Modern directions of theoretical and applied researches. – March 2014. URL: <http://www.sworld.com.ua/konfer34/104.pdf> (дата обращения: 20.01.2017).
17. СП 11–105–97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства». Ч. II. – М.: Госстрой РФ, 2000. – 45 с.
18. Постановление Правительства РФ № 360. Об определении границ затопления, подтопления. – М., 2014. – 8 с.
19. London Borough of Redbridge: Strategic Flood Risk Assessment. Level 2 Addendum. URL: <https://www.redbridge.gov.uk/me>

- dia/2285/draft-strategic-flood-risk-assessment-level-2-addendum.pdf (дата обращения: 20.01.2017).
20. Environmental state and buffering properties of underground hydrosphere in waste landfill site of the largest petrochemical companies in Europe / R.Kh. Musin, N.A. Kurlyanov, Z.G. Kalkamanoва, T.V. Korotchenko // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2016. № 33. – 012019. URL: [http://kpfu.ru/staff\\_files/F2037153077/EES\\_33\\_1\\_012019.pdf](http://kpfu.ru/staff_files/F2037153077/EES_33_1_012019.pdf) (дата обращения: 20.01.2017).
21. Медведков К.С., Штриплинг Л.О. Анализ подтопленной территории на примере грунтовых вод города Называевска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-podtoplyaemoj-territorii-na-primere-gruntovyh-vod-goroda-nazyvaevska> (дата обращения: 06.07.2017).

*Поступила 30.8.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Медведков К.С.**, аспирант кафедры промышленной экологии и безопасности Омского государственного технического университета, заместитель генерального директора по производству АО «Омская геологоразведочная экспедиция».

**Штриплинг Л.О.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной экологии и безопасности, проректор по учебно-методической работе Омского государственного технического университета.

UDC 556.3; 551.4

## DEGRADATION OF FLOODING SITUATION RELATED TO ANTHROPOGENIC EFFECTS ON THE EXAMPLE OF TYUKALINSK

**Kirill S. Medvedkov**<sup>1,2</sup>,  
kmedvedkov@mail.ru

**Lev O. Shtripling**<sup>2</sup>,  
los@omgtu.ru

<sup>1</sup> Omsk Geological Expedition,  
16, Gusarov street, Omsk, 644007, Russia.

<sup>2</sup> Omsk State Technical University,  
11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.

**Relevance** of the work is caused by the increase in the role of human factor in development of flooding areas. In recent years, in Omsk region spring flood exposed to a large quantity of settlements, including areas with satisfactory conditions. One of these settlements is Tyukalinsk where there are serious flooding problems in the last four years, that influenced the choice of the research object.

**The aim** of the study is to identify the causes of deterioration of spring flood situation, to search for solutions to flooding stabilization taking into account the presence of the river, carrying out the natural drainage area.

**The methods:** analysis of long-term observations of groundwater in the wells of regime subsurface condition of monitoring network taking into account the amount of precipitation, identification of graphical-analytical dependencies and causality.

**Results.** The authors have analyzed the long-term changes in groundwater levels, which enter into the river Tyukalka. They study the values of precipitation in the given territory for the periods of surveys. The causes of slow withdrawal of meltwater in spring and the accumulation of groundwater to the many years were identified. Despite the relatively high elasticity of admission and expenditure parts of the water balance (precipitation – surface water – groundwater) and high capacity for allotment of excess water by transit (crossing the city) Tyukalka river, numerous man-made structures such as carrying water pipes, dams, bulk bridges, road and many others, contribute significantly to the natural drainage, reducing the expenditure side of water balance. Regulation of river flow leads to poor drainage of both surface and groundwater, increasing the risk of flooding and the duration of the spring flood.

### Key words:

Groundwater, anthropogenic influence, unloading, flooding, high water, mode, well, observation, groundwater level, surface water, precipitation.

### REFERENCES

1. *Federalnaya sluzhba gosudarstvennoy statistiki (Rosstat). Chislennost naseleniya Rossiyskoy Federatsii po munitsipalnym obrazovaniyam na 1 yanvarya 2016 goda* [The population of the Russian Federation for municipalities on January 1, 2016]. Moscow, Rosstat Publ., 2017. 584 p.
2. Korbek K.L., Hose G.C. The weighted groundwater health index: Improving the monitoring and management of groundwater resources. *Ecological Indicators*, April 2017, vol. 75, pp. 164–181. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.11.039> (accessed 11 January 2017).
3. Tess Russo, Upmanu Lall, Hui Wen, Mary Williams. Assessment of trends in groundwater levels across the United States. *Columbia Water Center White Paper*, March 2014. Available at: [http://water.columbia.edu/files/2014/03/USGW\\_WhitePaper\\_FINAL.pdf](http://water.columbia.edu/files/2014/03/USGW_WhitePaper_FINAL.pdf) (accessed 11 January 2017).
4. Miller C., Mork L. *Whychus Creek Restoration Project at Camp Polk Preserve. 2014 Groundwater Monitoring Report*. Upper Deschutes Watershed Council Bend, Oregon November, 2014. Available at: <http://www.upperdeschuteswatershedcouncil.org/wp-content/uploads/2013/08/20141106-CP-Groundwater-Monitoring-Report-FINAL.pdf> (accessed 11 January 2017).
5. Raicy Mani Christy, Parimalarenganayaki Sundaram, Thirunavukkarasu Munuswamy, Thomas Lutz, Michael Schneider and Lakshmanan Elango. Ch. 6. Groundwater responses due to various MAR structures: Case studies from Chennai, Tamil Nadu, India. *Natural Water Treatment Systems for Safe and Sustainable Water Supply in the Indian Context*, 2015, pp. 99–112. Available at: [https://zenodo.org/record/61088/files/9781780408392\\_6.pdf](https://zenodo.org/record/61088/files/9781780408392_6.pdf) (accessed 05 February 2017).
6. Ieyasu Tokumoto, Katsumi Chiba, Masaru Mizoguchi, Hideki Miyamoto. Investigation of rootzone salinity with field monitoring system at tsunami affected rice fields in Miyagi, Japan. *Manuscript under review for journal SOIL*, 18 March 2016. Available at: <http://www.soil-discuss.net/soil-2016-12/soil-2016-12.pdf> (accessed 05 February 2017).
7. Roberts R. HydroResolutions, LLC. East Torrance Soil and Water Conservation District. *Evaluation of Groundwater Level Data from Estancia Basin*, January 2012. Available at: [http://ebwpc.org/PDFS/Evaluation\\_of\\_Groundwater\\_Level\\_Data\\_from\\_Estancia\\_Basin\\_Monitoring\\_Wells.pdf](http://ebwpc.org/PDFS/Evaluation_of_Groundwater_Level_Data_from_Estancia_Basin_Monitoring_Wells.pdf) (accessed 11 January 2017).
8. Yankovich E.P., Yankovich A.S. Informatsionnaya sreda dlya ekologo-geokhimicheskoy otsenki sostoyaniya podzemnoy gidrosfery [Information Environment for Ecological-geochemical assessment of the state of underground hydrosphere]. *Interesko Geo-Sibir 2012*. No. 3. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/informatsionnaya-sreda-dlya-ekologo-geokhimicheskoy-otsenki-sostoyaniya-podzemnoy-gidrosfery> (accessed 20 January 2017).
9. *Arkhiv pogody v Tyukalinske* [Weather archive in Tyukalinsk]. Available at: [https://rp5.ru/Архив\\_погоды\\_в\\_Тюкалинске](https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Тюкалинске) (accessed 21 June 2018).
10. SNiP 33–01–2003. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniya* [Hydraulic structures]. Moscow, Gosstroj Russii, 2004. 28 p.
11. Kuznetsov M.Yu. *Otchet po obektu: Provedenie monitoringovykh issledovaniy dna i beregov reki Tyukalka Tyukalinskogo munitsipalnogo rayona ot oz. Razliv do oz. Koshara* [Report on the project: Monitoring studies of the bottom and banks of the river Tyukalka Tyukalinsk municipal area from the Razliv lake to the Koshara lake]. Omsk, OGRE Publ., 2015. 156 p.

12. Podtoplenie – protsess upravliaemy [Flooding may be controlled]. *Tyukalinsky vestnik*, 6 September 2013, no. 36. Available at: <http://tukalinsk.ru/View.asp?objType=2&objValue=76760&rnd=02645776053116853> (accessed 15 October 2016).
13. Loseva L. Kogda vesna ne v radost [When the spring is not a joy]. *Tyukalinsky vestnik*, 15 April 2016, no. 15. Available at: <http://tukalinsk.ru/View.asp?objType=2&objValue=87947&rnd=07209831701924043> (accessed 15 October 2016).
14. Loseva L. Situatsiya pod kontrolem vlasti [The situation is under the control of authorities]. *Tyukalinsky vestnik*, 22 April 2016, no. 16. Available at: <http://tukalinsk.ru/View.asp?objType=2&objValue=88017&rnd=07548072539927448> (accessed 15 October 2016).
15. Razumova N.V., Razumov V.V., Molchanov E.N. Pereuvlazhnenie i podtoplenie pochv i zemel v Tsentralnom regione Rossii [Waterlogging and flooding of soils and land in Central Russia]. *Byulleten Pochvennogo instituta*, 2016, no. 82. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/pereuvlazhnenie-i-podtoplenie-pochv-i-zemel-v-tsentralnom-regione-rossii> (accessed 20 January 2017).
16. Esenov P.E., Starodubtsev V.M. Changes in soil-ameliorative conditions of the Tejen river delta. *Modern directions of theoretical and applied researches*, March 2014. Available at: <http://www.sworld.com.ua/konfer34/104.pdf> (accessed 20 January 2017).
17. SP 11–105–97 *Inzhenerno-geologicheskie izyskaniya dlya stroitelstva* [Engineering survey for construction]. Moscow, Gosstroy RF, 2000. P. II, 45 p.
18. Postanovlenie Pravitelstva RF № 360. *Ob opredelenii granits zatopleniya, podtopleniya* [Determining the boundaries of flooding]. Moscow, 2014. 8 p.
19. *London Borough of Redbridge: Strategic Flood Risk Assessment. Level 2 Addendum*. Available at: <https://www.redbridge.gov.uk/media/2285/draft-strategic-flood-risk-assessment-level-2-addendum.pdf> (accessed 20 January 2017).
20. Musin R.Kh., Kurlyanov N.A., Kalkamanova Z.G., Korotchenko T.V. Environmental state and buffering properties of underground hydrosphere in waste landfill site of the largest petrochemical companies in Europe. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2016, no. 33, 012019. Available at: [http://kpfu.ru/staff\\_files/F2037153077/EES\\_33\\_1\\_012019.pdf](http://kpfu.ru/staff_files/F2037153077/EES_33_1_012019.pdf) (accessed 20 January 2017).
21. Medvedkov K.S., Shtripling L.O. Analysis of flooded areas on the example of ground waters in Nazyvaevsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 4. In Rus. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-podtoplyaemoy-territorii-na-primere-gruntovyyh-vod-goroda-nazyvaevska> (accessed 06 July 2017).

Received: 30 August 2018.

#### Information about the authors

**Kirill S. Medvedkov**, postgraduate student, Omsk State Technical University; deputy director, Omsk Geological Expedition.

**Lev O. Shtripling**, Dr. Sc., professor, head of the department, Omsk State Technical University.

УДК 551.4.08

## РЕГИОНАЛЬНАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ ОЦЕНКА РЕЛЬЕФА РАЙОНА ПРОХОЖДЕНИЯ ПРОЕКТИРУЕМОГО ГАЗОПРОВОДА В САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Черноморец Лев Сергеевич,  
mrblacksea@mail.ru

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1.

**Актуальность** исследования определяется недостаточной изученностью отношений между рельефообразованием и строительством газотранспортных систем. Решение научно-прикладных задач инженерной деятельности, таких как выбор оптимальной трассы для трубопроводов, проектирование мероприятий по инженерной защите сооружений и рекультивации земель, планирование мониторинга участков газотранспортных систем, требует оценки инженерно-геоморфологических условий. Данное исследование представляет собой опыт выполнения такой оценки на региональном уровне.

**Целью** работы является выполнение региональной инженерно-геоморфологической оценки района прохождения газотранспортных систем (на примере участка проектируемого газопровода в Саратовской области). Оценивание проводилось по морфометрическим, морфолитоологическим, морфодинамическим и смешанным критериям, применимым на региональном масштабом уровне.

**Основные методы:** картографический метод, сравнительно-географический метод, полевое геоморфологическое и ландшафтное картографирование, морфометрический и статистический анализ, морфолитогенетический анализ, геоинформационный анализ (с использованием материалов радарной съемки рельефа SRTM), дешифрирование космических снимков. Графические и расчетные построения выполнялись с помощью программ MS Office, ArcGIS, AutoCAD и Global Mapper.

**Результаты.** Была проведена региональная инженерная оценка рельефа для участка размещения газотранспортных систем в Саратовской области. На объекте, выбранном для региональной оценки, наиболее сложные в инженерно-геоморфологическом отношении участки представлены на переходах долин рек. Склоны и днища долин, чередующиеся с междуречными пространствами, определяют дифференциацию трассы по морфолитоологическим и морфодинамическим условиям. Северная часть территории прохождения трассы более благоприятна с точки зрения расчлененности рельефа. В то же время на юге (в Лысогорском районе) имеется более развитая транспортная инфраструктура.

### Ключевые слова:

Инженерно-геоморфологическая оценка, критерии оценки рельефа, газотранспортные системы, строительство газопроводов, рельеф Саратовской области.

### Введение

Вопросы оценок территории и, в частности, рельефа разрабатываются для разных видов природопользования. Отмечают несколько тенденций в применении оценок в географии и геоморфологии: стремление к сокращению числа показателей оценки путем выделения из них ведущих, предпочтению количественных показателей качественным и сведению элементарных показателей в комплексные.

Удаленность газовых месторождений от потребителя вызывает необходимость строительства магистральных газопроводов, предназначенных для перемещения газа из районов добычи к пунктам потребления. Они образуют газотранспортные системы (ГТС).

Рельеф территории оказывает влияние на строительство ГТС. Накопленный опыт по строительству трубопроводных систем в России и за рубежом также указывает на необходимость учета инженерно-геоморфологических особенностей территории, что отражено в отраслевой нормативной документации [1–3] и научно-практической литературе [4–15].

С.Б. Кузьмин [7] отмечает необходимость оценки геоморфологических процессов и риска природопользования на разных пространственно-таксономических уровнях, однако указывает на невоз-

можность сделать это на единой критериальной основе. Поэтому набор применимых критериев инженерно-геоморфологической оценки по разным группам (морфометрические, морфолитоологические, морфодинамические, смешанные) зависит от уровня рассмотрения – мелкомасштабного, регионального или локального [15].

Целью настоящей работы является выполнение региональной инженерно-геоморфологической оценки района прохождения ГТС (на примере участка проектируемого газопровода в Саратовской области). Подобная оценка по частным критериям может быть использована для:

- проектирования мероприятий по инженерной подготовке территории к строительству;
- выявления участков, требующих специальных мер инженерной защиты;
- проектирования мероприятий по рекультивации нарушенных земель;
- оптимизации экологического мониторинга и контроля при строительстве и эксплуатации сооружений, а также решения многих других задач.

Исследование основано на материалах собственных полевых геолого-геоморфологических исследований автора и его коллег на объекте, а также литературных и фондовых данных (в том числе, материалах радарных съемок рельефа

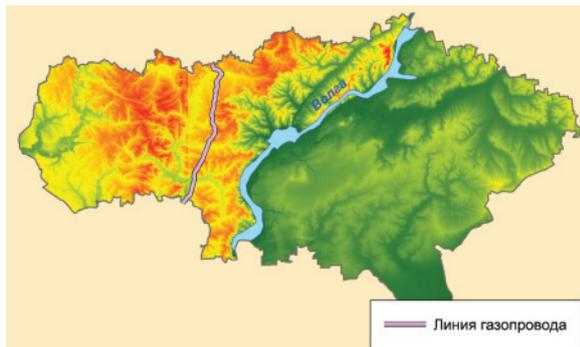
SRTM и GTOPO30). Графические и расчетные построения выполнены с помощью пакета MS Office, а также программ ArcGIS, AutoCAD и Global Mapper.

#### Объект исследования

В качестве объекта региональной инженерной оценки рельефа был выбран участок проектируемого магистрального газопровода в Саратовской области (рис. 1).

Проектируемый газопровод расположен в пределах (с севера на юг, по ходу газа) Петровского, Аткарского, Татищевского и Лысогорского муниципальных районов.

В пределах области участок газопровода имеет длину около 170 км и приурочен к восточному крылу Воронежской антеклизы Восточно-Европейской платформы. Ее фундамент сложен гнейсами, гранитами, кристаллическими сланцами. Он имеет ступенчатое строение, меняя глубину залегания с северо-запада на юго-восток от 1 до 12–13 км [16]. Участок находится в поле амплитуд новейших тектонических движений от 200 до 500 м. Современные вертикальные движения имеют тенденцию к несильному (до 4 мм/год) опусканию [17].



**Рис. 1.** Положение участка трассы проектируемого газопровода в пределах Саратовской области (цветом обозначены высоты в непрерывной шкале от наибольших к наименьшим по возрастанию теплоты тона)

**Fig. 1.** Location of the projected gas pipeline route within the Saratov region (the color represents height in a continuous scale from lowest to highest in ascending order of warmth of tone)

Четвертичные отложения Саратовской области характеризуются небольшой мощностью, представлены аллювиальными (песок, галечник, супеси, суглинки), морскими (глина, песок), ледниковыми (суглинки, глины с валунами) и водноледниковыми (пески) образованиями. Граница максимального (днепровского) оледенения проходит по восточному борту долины р. Медведица [18] и не достигает трассы проектируемого газопровода, не доходя до нее около 30 км.

Оценка выполнялась в пределах «зоны возможного влияния» (ЗВВ), которой считалась трехкилометровая полоса по 1,5 км в обе стороны от оси газопровода.

#### Методы исследования и обсуждение результатов

Для инженерно-геоморфологической оценки на региональном масштабном уровне были выбраны следующие критерии:

- морфолитологические (свойства поверхностных грунтов);
- морфометрические (уклоны, расчлененность территории);
- морфодинамические (развитие опасных экзогенных процессов);
- смешанные (техногенный рельеф: транспортная инфраструктура).

Оценка по морфолитологическим критериям

Учет литологических особенностей территории на среднем масштабе (на уровне субъекта РФ) без использования материалов инженерных изысканий можно провести лишь в обобщенном виде. Среднемасштабные геологические карты не всегда могут дать информацию о конкретных участках вдоль трассы газопровода, на которых встречаются неустойчивые, размываемые или карстующиеся грунты.

В соответствии с картой четвертичных отложений из Атласа Саратовской области [18] вдоль трассы проектируемого газопровода (ПГ) представлены аллювиальные (пески, суглинки, глины), элювиально-делювиальные (суглинки, щебень) отложения и дочетвертичные породы (палеогеновые пески, песчаники, опоки, глины). Аллювиальные отложения в значительных количествах встречаются в долинах рек. Палеогеновые осадки отмечаются на приводораздельных частях структурных останцов междуречий. Элювиально-делювиальные отложения покрывают остальную часть просторств между долинами.

Наложение контуров с карты четвертичных отложений на ЗВВ позволило произвести сегментацию трассы по литологическим условиям на районы трех типов (рис. 2), которым соответствуют определенные комплексы рельефа:

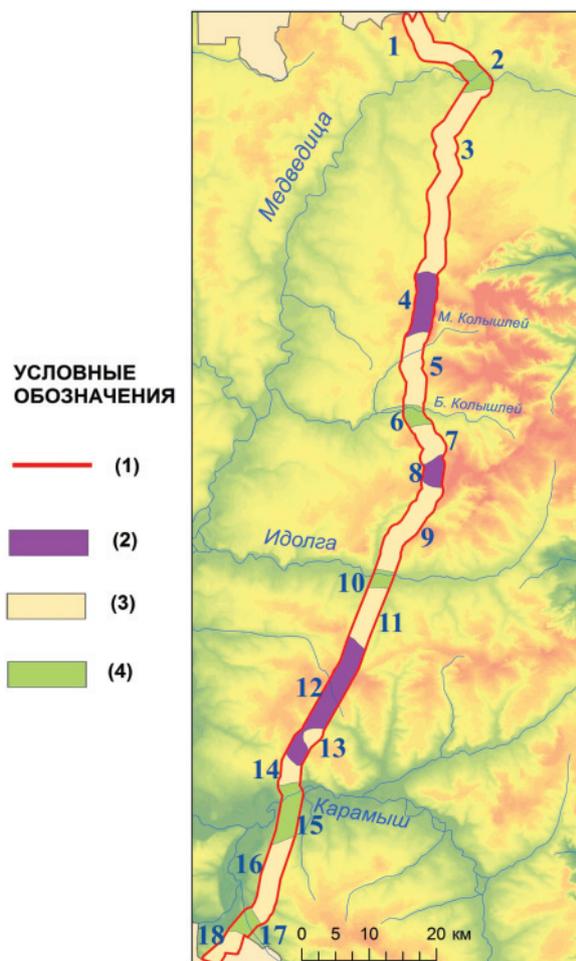
- 1) дочетвертичные отложения под приводораздельными поверхностями междуречий – 95 км<sup>2</sup> в пределах ЗВВ (20 % от общей площади);
- 2) нерасчлененные элювиально-делювиальные отложения (суглинки, щебень) на междуречьях и склонах речных долин – 306 км<sup>2</sup> в пределах ЗВВ (66 % от общей площади);
- 3) современные и верхнечетвертичные аллювиальные отложения (пески, суглинки, глины) в комплексах речных долин – 64 км<sup>2</sup> (14 %).

В результате было проведено типологическое районирование трассы: по контурам распространения четвертичных отложений выделено 18 районов ЗВВ с разными морфолитологическими условиями. Площадь выделенных районов очень изменчива. Наибольшей площадью в 93 км<sup>2</sup> характеризуется район 3 (нумерация с севера на юг по ходу газа, рис. 2) на междуречье рек Медведицы и Малого Кольшлея, относящийся ко второму типу. Минимальная площадь имеет место в районе

13 этого же типа (трасса пересекает его, однако он не проходит через ЗВВ целиком, будучи окруженным районом 12).

Меньше других в пределах ЗВВ (14 %) представлены по площади районы третьего типа. К таковым относятся районы 2, 6, 10, 15 и 17 (переходы трассы через Медведицу, Б. Колышлей, Идолгу, Карамыш и Большую Копенку соответственно).

Поскольку данное генерализованное районирование является по своей сути геоморфологическим, оно было использовано в дальнейшем при анализе по некоторым критериям других групп.



- 1 – зона возможного влияния (ЗВВ)  
2 – дочетвертичные отложения под приводораздельными поверхностями междуречий  
3 – нерасчлененные элювиально-делювиальные отложения (суглинки, щебень) на междуречьях и склонах речных долин  
4 – современные и верхнечетвертичные аллювиальные отложения (пески, суглинки, глины) в комплексах речных долин

**Рис. 2.** Типологическое районирование саратовского участка зоны возможного влияния трубопровода по морфолитогеологическим условиям строительства

**Fig. 2.** Typological zoning of the Saratov section of possible affected area of the pipeline on morpholithological conditions for construction

Одной из основных целей оценки грунтов для строительства линейной части магистральных трубопроводов является выявление участков с

грунтами, более или менее сложными для разработки. От физико-механических свойств грунтов зависит крутизна откосов траншей и котлованов.

Ряд источников, рассматривающих грунты с точки зрения трудности их разработки [6, 19, 20,], свидетельствуют о наличии двух рядов возрастания сложности: 1) несвязные–связные–скальные и 2) сухие–влажные–мокрые грунты. В рамках региональной литологической оценки можно выделить относительно сложные и относительно простые участки, используя морфолитогеологический подход.

По характеру связности практически все поверхностные грунты вдоль трассы можно отнести к относительно простой (несвязные грунты) и, реже, осложненной категории (связные и скальные грунты). Так, грубообломочные карбонатные породы вскрываются иногда в днищах эрозионных форм. Такими примерами могут служить врезы в отвешках балок водосбора Б. Копенки (районы 16, 17) и на склоне долины Б. Колышлея (юг района 5). Участки с обводненными грунтами также распространены ограниченно и приурочены по большей части к поймам рек. Наиболее полно поймы в пределах трассы представлены у рек Медведица, Б. Колышлей, Идолга и Карамыш (районы 2, 6, 10 и 15).

#### Оценка по морфометрическим критериям

Для морфометрической оценки была построена серия карт. В первую очередь при морфометрических исследованиях чаще всего строится гипсометрическая карта территории.

Гипсометрическая карта построена по данным радарной топографической съемки SRTM разрешением около 90 м. Точность цифровой модели рельефа на основе съемки SRTM соответствует точности, применяющейся при создании карт масштаба 1:50000–1:100000 [21–23]. Для улучшения отображения пластики рельефа было выбрано сечение изолиний в 10 м.

Диапазон абсолютных отметок вдоль трассы ПГ выявил 19 высотных интервалов (табл. 1).

Большая часть саратовского участка проходит по высотам 200–250 м. Смещенность распределения в сторону больших высот можно связать с тем, что выбор трассы обычно тяготеет к приводораздельным пространствам.

Линия проектируемого газопровода пересекает 36 водотоков, наиболее крупными из которых (с севера на юг) являются реки и речки: Медведица, Мокрая, Озерки, Малый и Большой Колышлей, Малая Идолга, Идолга, Сухая Двоенка, Карамыш, Большая и Малая Копенки, Мокрая Песковатка.

Анализ гипсометрической карты позволил выявить ряд особенностей участка. Трасса практически целиком находится в бассейне р. Медведицы и по большей части проходит по ее левобережью субпараллельно простирацию долины, пересекая ее левые притоки и чередующиеся с ними междуречные пространства.

**Таблица 1.** Распределение высот по интервалам вдоль трассы саратовского участка проектируемого газопровода

**Table 1.** Distribution of heights in intervals along the route of the Saratov section of the projected gas pipeline

№	Интервал высот, м Height range, m	Доля участков трассы Percentage of route sections (%)
1	<120	0,1
2	120–130	3,2
3	130–140	1,1
4	140–150	2,3
5	150–160	4,5
6	160–170	3,4
7	170–180	3,1
8	180–190	5,6
9	190–200	6,5
10	200–210	8,2
11	210–220	12,5
12	220–230	9,8
13	230–240	11,6
14	240–250	9,0
15	250–260	6,6
16	260–270	8,2
17	270–280	2,7
18	280–290	1,7
19	>290	0,1

Наибольшие абсолютные высоты вдоль линии газопровода представлены на междуречье Большого Колышлея и Малой Идолги (290 м). Минимальные высоты наблюдаются на переходе трубопровода через р. Карамыш (около 120 м).

По цифровой модели рельефа были рассчитаны уклоны в пределах ЗВВ проектируемого газопровода. Условия уклонов характеризовались согласно нормативным требованиям к строительству трубопроводов [1]. Оказалось удобным рассматривать карту уклонов совместно с гипсометрической. Параллельно для получения более полного представления об участках рассматривались привязанные топографические и космические снимки.

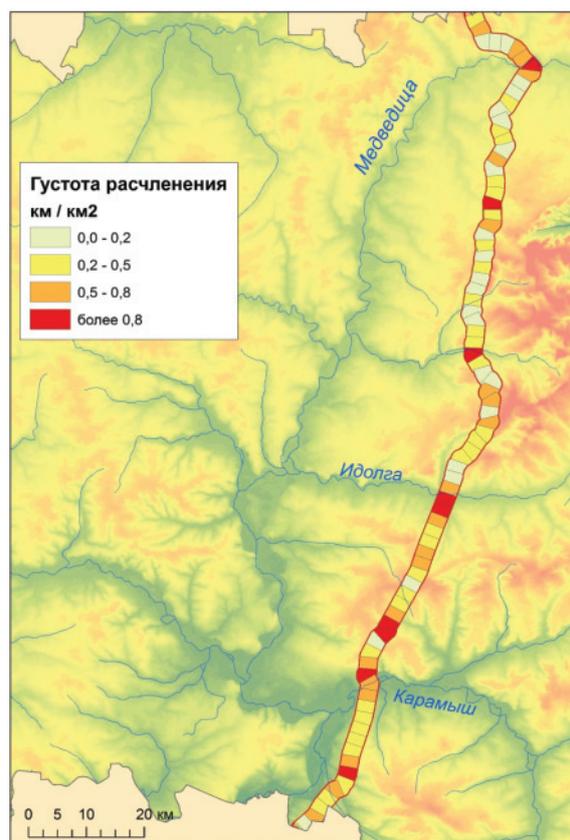
При анализе ЗВВ при данном разрешении модели не было обнаружено участков с очень сложными условиями строительства по уклонам. Осложненные по уклонам районы приурочены, как правило, к склонам долин рек и ручьев, попадающих в пределы ЗВВ. Такие участки встречаются в долинах Большого и Малого Колышлея, Малой Идолги, в верховьях р. Грязнухи в районе пересечения трассы с дорогой «Калининск–Саратов», в долине одного из истоков р. Сухой Двоенки.

*Горизонтальная расчлененность (густота расчленения)* рассчитывается как длина водотоков на единицу площади. Учитывая специфику исследуемого объекта (его линейность), было решено перейти от площадных параметров к линейным.

Саратовский участок трассы проектируемого газопровода был поделен на отрезки длиной 2 км. Затем с помощью инструментов анализа ArcGIS (Analysis Tools/Proximity/Buffer) были построены буферные зоны вокруг отрезков. Ширина буфер-

ной зоны задавалась по 1,5 км в каждую сторону от трассы (в соответствии с шириной трехкилометровой полосы ЗВВ). Так были получены полигоны вдоль трассы примерной площадью  $3 \times 2 = 6 \text{ км}^2$  каждый.

Полуавтоматическим путем были рассчитаны длины водотоков в пределах каждого полигона, что при соотношении с площадью дало значение густоты расчленения. Для удобства записи (чтобы значащие цифры располагались в разрядах целых и десятых долей) коэффициент расчлененности был выражен в километрах на  $\text{км}^2$  (рис. 3).



**Рис. 3.** Густота расчленения рельефа вдоль трассы саратовского участка проектируемого газопровода

**Fig. 3.** Horizontal terrain dissection along the route of the Saratov section of the projected gas pipeline

Средняя густота расчленения по всему саратовскому участку трассы составила  $0,4 \text{ км}/\text{км}^2$ . Максимальная горизонтальная расчлененность ( $1,1 \text{ км}/\text{км}^2$ ) зафиксирована к югу от р. Идолги на ее левобережье: здесь в ее долину открывается несколько эрозионных форм субпараллельно трассе. Высокая степень густоты расчленения наблюдается на нескольких участках в районе переходов ПГ через Медведицу, ручьи Мокрая и Озерки, Б. Колышлей, Идолгу, разветвленные верховья Сухой Двоенки, Карамыш и М. Копенку. Наименее расчлененные участки отмечены на междуречьях руч. Мокрая и р. Медведицы (к югу и юго-востоку от Петровска) и на междуречье руч. Озерки и р. Малый Колышлей.

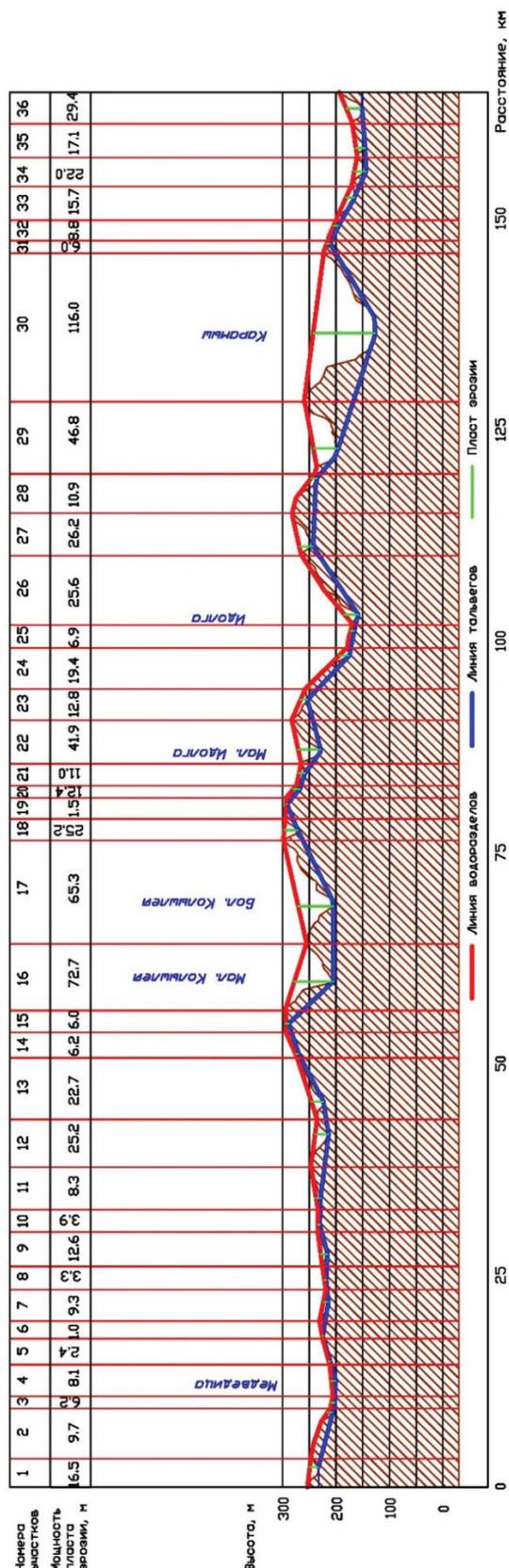


Рис. 4. Мощность пласта эрозии вдоль линии проектируемого газопровода в Саратовской области

Fig. 4. Thickness of the erosion layer along the route of the projected gas pipeline in the Saratov region

Для оценки вертикальной расчлененности (глубины расчленения) было решено воспользоваться методикой расчета пласта эрозии, разработанной И.С. Воскресенским под руководством профессоров С.С. Воскресенского, Г.С. Ананьева и д.г.-м.н. В.П. Полеванова. Она использовалась С.С. Воскресенским для характеристики величины работы, проделанной эрозией совместно со склоноформирующими процессами [24]. Для удобства работы профиль строился по менее детальной цифровой модели рельефа (ЦМР), построенной по данным съемки ГТОРО30 (разрешение 30 угловых секунд, или около 900 м).

Методика предполагает выделение на профиле водоразделов и тальвегов (точек соответственно максимума и минимума высот). По точкам происходит построение двух линий – линии водоразделов и линии тальвегов. Линии проводятся через все экстремумы профиля (и только через них), независимо от масштаба эрозионных форм. Исключением являются случаи, когда линии огибают рельеф, чтобы профиль не выходил за пространство между ними. Тогда они проходят по касательной к линии профиля. Расстояние между линией тальвегов и линией водоразделов в створе тальвега называется мощностью пласта эрозии ( $M_{\text{п}}$ , м) на участке. Участки ограничиваются вертикалями, проходящими на профиле через точки водоразделов. Мощность пласта отражает глубину врезания данной эрозионной формы относительно ближайших междуречий.

Всего в пределах исследуемой территории было выделено 36 участков. Рассчитанный указанным способом пласт эрозии (рис. 4) изменяет свою мощность от 1 м к югу от долины р. Медведицы до 116 м в районе долины р. Карамыш.

Средняя величина превышения водоразделов над тальвегами составила около 20 м. В целом можно выделить два неравных района в пределах трассы: менее расчлененный северный, где мощность редко достигает до 25 м, и более расчлененный южный (от бровки долины Мал. Колышлея, уч. 15, 16). Южный район имеет максимальные показатели мощности пласта эрозии в долинах рек Б. и М. Колышлей, Идолга, М. Идолга и Карамыш, что вполне естественно. Особенно расчленена многочисленными и яркими оврагами его южная часть, в районе водосбора р. Б. Копенки (рис. 5).

Оценка по морфодинамическим критериям

В соответствии с Общим сейсмическим районированием ОСР-2015 В саратовский участок трассы ПГ расположен в ареале менее 6 баллов. Сейсмичность повышается к востоку от него (в районе долины р. Волги).

Тектоническая карта в Атласе Саратовской области [18] отражает отсутствие в пределах трассы и ЗВВ разломных зон. На карте новейшей тектоники [17] видно, что исследуемый участок находится в поле амплитуд новейших тектонических движений от 200 до 500 м. Иными словами, дан-



**Рис. 5.** Овраг в одном из притоков ручья Большая Копенка

**Fig. 5.** Ravine in one of the tributaries of the Bolshaya Kopenka stream

ная территория довольно медленно поднимается. Это позволяет предположить, что ведущая роль во взаимодействии трубопровода и рельефа будет принадлежать экзогенным, а не эндогенным процессам.

Инженерные изыскания, проводившиеся летом 2011 г. на территории саратовского участка ПГ, включали описание опасных экзогенных геоморфологических процессов и гидрогеологических явлений (ОЭГП и ГЯ). Описывались как действующие на сегодняшний день процессы, так и потенциальные (то обстоятельство, что на протяжении более половины своей длины трасса дублирует действующий газопровод, позволяет использовать метод аналогов для прогноза). Среди основных процессов и явлений были выделены:

- эрозионные (линейная и боковая эрозия);
- склоновые;
- суффозионно-просадочные;
- подтопление и затопление;
- заболачивание.

По собранному автором и его коллегами полевым материалам была составлена карта ОЭГП и ГЯ. При работе над ней использовались топографические карты масштаба 1:200000 и космические снимки разного разрешения.

Статистический анализ карты позволил оценить пораженность ЗВВ проектируемого газопровода опасными процессами и явлениями (путем со-

отнесения площади контуров на составленной карте с площадью ЗВВ). Общая площадь ЗВВ составляет около 494,6 км<sup>2</sup>. Области возможного проявления делювиального смыва и массового смещения обломочного чехла занимают 34,3 км<sup>2</sup>, или 6,9 % от ЗВВ, а участки возможного развития блоковых движений на склонах – 5,7 км<sup>2</sup> (1,2 %). Суффозионно-просадочные явления при полевых изысканиях зафиксированы в 9 местах. Площадная пораженность территории опасными гидрогеологическими явлениями (процессами подтопления, затопления и заболачивания) составила 8,4 км<sup>2</sup> (1,7 % от ЗВВ).

Общая длина эрозионных врезов по карте составила более 70 км. При этом большая часть врезов (73 вершины из 115) являются заросшими и/или неактивными. Активные («свежие») врезы составили 26,5 % от общей длины. Тем не менее потенциальная активизация эрозии на стабилизированных участках не исключается при начале строительства сооружения.

Области развития ОЭГП и ГЯ распределены в пределах трассы неравномерно. С севера и до долины Б. Колышлея опасные склоновые процессы проявляются незначительно, а участки с подтоплением, заболачиванием и эрозией локализованы в днищах долин протекающих в пределах ЗВВ водотоков (Тауза, Мокрая, Озерки и др.), а также отвершков овражно-балочной сети их водосборов.



**Рис. 6.** Сложный овражно-балочный рельеф в верховьях р. Сухая Двоенка

**Fig. 6.** Complicated gully topography in the upper reaches of the Sukhaya Dvoyenka river

Максимальная протяженность пойменно-руслового комплекса вдоль трассы наблюдается у р. Медведицы (район 2, около 600 м). Для Большого Колышлея и Идолги (районы 6 и 10) данная величина составляет 450 и 300 м соответственно, а для Карамыша (район 15) она сравнительно невелика (около 80 м). Большая площадь флювиально-морфолитологического комплекса, по которому выделен район 15 в пределах ЗВВ, связана в большей степени не с поймой, а с надпойменной террасой Карамыша.

В районе перехода через долину р. Идолги (район 10) активнее всего развито подтопление и заболачивание (22 % в пределах района). Участком ЗВВ с наибольшим развитием ОЭГП и ГЯ является ее южная часть, в особенности расчлененные многочисленными оврагами борта р. Бол. Копенки (рис. 6, районы 16–18). Достаточно сложными участками являются овраги в верховьях Сухой Двоенки (район 12) и склоны долины Мокрой Песковатки (район 18).

Оценка по смешанным критериям  
(учет транспортной инфраструктуры)

Ряд исследователей рассматривает здания и сооружения как результаты антропогенного или техногенного рельефообразования [25, 26]. Традиционным аргументом в пользу отнесения их к рельефу является то, что здания и сооружения, а также преобразованные поверхности естественно-го рельефа выполняют те же функции, что и ре-

льеф в природно-территориальных комплексах. Это особенно заметно в крупных городах, где здания очень сильно влияют на микроклимат, ветровые потоки, поверхностный сток и т. д.

Дороги (железные и автомобильные) можно рассматривать в качестве специфических форм рельефа техногенного генезиса. В частности, их протяженность является морфологической (морфометрической) характеристикой, которая по этим основаниям может быть учтена в качестве критерия инженерной оценки рельефа.

Поэтому было решено проанализировать условия транспортной доступности района прохождения трассы. При этом для разделения трассы использовались единицы административно-территориального деления.

Кроме оценки территории, в пределах которой непосредственно производится строительство сооружений, важно учитывать необходимость доставки к ней материалов, строительной техники и рабочих. Доставка труб осуществляется в основном железнодорожным (полувагоны, трубоплатформы) и автомобильным (оборудованным, необорудованным) транспортом.

Подходящие к линии проектируемого газопровода трассы автомобильных и железных дорог, а также наблюдаемые вдольтрассовые проезды существующего газопровода дешифрировались по космическим снимкам разного разрешения.

Для обеспечения доступа к трассе при строительстве и при дальнейшей эксплуатации маги-

стральных трубопроводов часто формируются вдольтрассовые проезды. Поскольку большая часть трассы была расположена в коридоре существующего газопровода «Починки–Изобильное», на большом протяжении (всего около 110 км от трассы) они уже имелись.

**Таблица 2.** Количество подъездов дорог к трассе ПГ и протяженность вдольтрассовых проездов по районам Саратовской области

**Table 2.** Number of road entrances to the route of the designed gas pipeline and the length of the service driveways by districts of the Saratov region

Муниципальные районы Municipal districts	Протяженность трассы, км (%) Length of the route, km (%)	Количество дорожных подъездов к трассе газопровода, шт. Number of road entrances to the pipeline route, pcs.	Протяженность имеющихся вдольтрассовых проездов, км (% от протяженности участка) Length of available service driveways, km (% of section length)
Петровский Petrovsky	59,4 (35,7)	7	17,9 (30,1)
Аткарский Atkarsky	18,0 (10,8)	1	11,9 (66,1)
Татищевский Tatischevsky	32,5 (19,5)	2	28,7 (88,4)
Лысогорский Lysogorsky	56,4 (33,9)	7	51,3 (90,9)
Всего Total	166,3 (100,0)	17	109,7 (66,0)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- СП 36.13330.2012 Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06–85\*. – М.: Госстрой, 2013. – 97 с.
- СП 115.13330.2016 Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция СНиП 22–01–95. – М.: Минстрой России, 2016. – 49 с.
- ISO 13623:2009 «Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems», NEQ. – Switzerland, 2009. – 11 p.
- Симонов Ю.Г., Кружалин В.И. Инженерная геоморфология. – М.: МГУ, 1993. – 208 с.
- Mohitpour M., Golshan H., Murray A. Pipeline Design & Construction: a Practical Approach. 2<sup>nd</sup> ed. – New York: ASME Press, 2003. – 656 p.
- Волков А.В. Инженерно-геоморфологическая оценка условий строительства газотранспортных систем в Ленинградской области: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – М., 2009. – 24 с.
- Кузьмин С.Б. Оценка риска природопользования для субъектов Российской Федерации // Геориск. – 2016. – № 2. – С. 30–37.
- Abspoel L., Courage W., Dabekausen W., de Bruijn R., Kruse H., Wiersma A.P., Hijma M.P., van den Heuvel F., van den Broeck W. Risk-based asset management: automated structural reliability assessment of geographically distributed pipeline networks for gas and water in the Netherlands // Structure and Infrastructure Engineering. – 2018. – V. 14. – № 7. – P. 928–940.
- Aloqaily A. Cross Country Pipeline Risk Assessments and Mitigation Strategies. – Houston: Gulf Professional Publishing, 2018. 198 p.

Железнодорожные трассы пересекают линии проектируемого газопровода в двух местах – в долинах рек Медведицы (Петровский район) и Малой Идолги (Татищевский район). Данные по количеству подъездов автодорог к проектируемому газопроводу (пересечений его с автодорогами), а также по протяженности вдольтрассовых проездов сведены в табл. 2.

Из таблицы видно, что уже имеющимися вдольтрассовыми проездами более всего обеспечен участок трассы в Лысогорском районе (южная часть саратовского сектора трассы). На нем же зафиксирована и наибольшая плотность подъездов автодорог (в среднем примерно 1 подъезд на 8 км).

#### Заключение

На объекте, выбранном для региональной оценки рельефа (проектируемый газопровод в Саратовской области), наиболее сложные в инженерно-геоморфологическом отношении участки представлены на переходах через долины рр. Медведица, Б. Колышлей, Идолга и Карамыш. Комплексы рельефа (склоны и днища долин, чередующиеся с междуречными пространствами) определяют дифференциацию по литологическим и морфодинамическим условиям вдоль трассы. Оценивание по морфометрическим критериям обнаруживает дополнительно, что северная часть территории прохождения трассы более благоприятна с точки зрения расчлененности рельефа. В то же время южная часть трассы (в Лысогорском районе) имеет более развитую транспортную инфраструктуру (в большей степени обеспечена вдольтрассовыми проездами).

- Risk Assessment of Long Gas and Oil Pipeline Projects Inducing Landslide Disasters during Construction / M. Bai, Y. Du, Y. Chen, Y. Xing, P. Zhao // Journal of Performance of Constructed Facilities. – 2017. – V. 31. – № 5. – P. 04017063 (1–7).
- Ermolaeva A.V. Application of groundwater aggressiveness assessment method for estimation of the karst process at main gas pipeline construction // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2016. – V. 33 – P. 012049 (1–7).
- Erwin S.O., Schmidt J.C., Allred T.M. Post-project geomorphic assessment of a large process-based river restoration project // Geomorphology. – 2016. – V. 270. – P. 145–158.
- Geach M. R., Stokes M., Hart A. The application of geomorphic indices in terrain analysis for ground engineering practice // Engineering Geology. – 2017. – V. 217. – P. 122–140.
- Shabarchin O., Tesfamariam S. Risk assessment of oil and gas pipelines with consideration of induced seismicity and internal corrosion // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2017. – V. 47. – P. 85–94.
- Черноморец Л.С. Критерии инженерной оценки рельефа при строительстве газотранспортных систем // Естественные и технические науки. – 2015. – № 9. – С. 81–87.
- География Саратовской области / под ред. С.Г. Воскресенского. – Саратов: Детская книга, 1997. – 224 с.
- Национальный атлас России. Т. 2. Природа и экология. – М.: Роскартография, 2007. – 495 с.
- Атлас Саратовской области / под ред. В.Г. Лебедева. – М.: ГУГК, 1978. – 31 с.
- Технология строительного производства / С.С. Атаев, Н.Н. Данилов, Б.В. Прыкин и др.. – М.: Стройиздат, 1984. – 559 с.

20. ГОСТ 25100–2011 Грунты. Классификация. – М.: МНТКС, 2013. – 63 с.
21. Practical use of SRTM data in the tropics: Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data / A. Jarvis, J. Rubiano, A. Nelson, A. Farrow, M. Mulligan. – Cali, CO: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2004. – 32 p.
22. Karwel A., Ewiak I. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. V. XXXVII, P. B7. – Beijing, 2008. – P. 169–172.
23. Карионов Ю.И. Оценка точности матрицы высот SRTM // Геопрофи. – 2010. – № 10. – С. 48–51.
24. Воскресенский С.С. Геоморфология Сибири (плоскогорья и низменности Восточной Сибири, горы Южной Сибири). – М.: МГУ, 1957. – 315 с.
25. Симонов Ю.Г., Симонова Т.Ю. Фундаментальные проблемы антропогенной геоморфологии // Геоморфология. – 2013. – № 3. – С. 3–11.
26. Тимофеев Д.А. Рельефообразование природное и антропогенное: различия истинные и мнимые // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 1995. – № 6. – С. 123–126.

*Поступила 10.09.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Черноморец Л.С.**, соискатель кафедры геоморфологии и палеогеографии географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

UDC 551.4.08

## REGIONAL ENGINEERING ASSESSMENT OF THE RELIEF OF THE PROJECTED GAS PIPELINE AREA PASSAGE IN SARATOV REGION

Lev S. Chernomorets,

mrblacksea@mail.ru

Lomonosov Moscow State University,  
1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the lack of study of relations between relief and construction of gas transportation systems. The decision of scientific and applied engineering problems, such as choice of optimal route for pipelines, design of measures for engineering protection of facilities and land reclamation, planning of monitoring areas of gas transportation systems, requires an assessment of engineering and geomorphological conditions. This study represents regional-scaled experience of such an assessment.

**The aim** of this work is the regional engineering geomorphological assessment of the area of gas transportation systems passage (for example, the site of the proposed gas pipeline in the Saratov region). The assessment was carried out by morphometric, morpholithologic, morphodynamic and complex criteria applicable at the regional scale level.

**Methods:** cartographic method, comparative-geographical method, field geomorphological and landscape mapping, morphometric and statistical analysis, morpholithogenesis analysis, GIS analysis (using radar digital topographic database SRTM), interpretation of space images. Graphics and design build was performed by using MS Office, ArcGIS, AutoCAD and Global Mapper.

**Results.** The author has carried out regional engineering assessment of the relief for the route of gas transportation systems in Saratov region. At the site selected for regional assessment, the most difficult geomorphological areas are presented at the crossings of river valleys. The slopes and bottoms of the valleys, alternating with the watershed areas, determine the route differentiation by morpholithologic and morphodynamic conditions. The Northern part of the territory is more favorable in terms of the terrain dissection along the route. At the same time, in the South (in the Lysogorsky district) there is more developed transport infrastructure.

### Key words:

Engineering and geomorphological assessment, relief estimation criteria, gas transportation system, gas pipeline construction, relief of Saratov region.

### REFERENCES

- SP 36.13330.2012 *Magistralnye truboprovody* [Main pipelines]. Actualized edition of SNiP 2.05.06–85\*. Moscow, Gosstroy Publ., 2013. 97 p.
- SP 115.13330.2016 *Geofizika opasnykh prirodnikh voystviy* [Geophysics of natural hazards]. Actualized edition of SNiP 22–01–95. Moscow, Minstroy Rossii Publ., 2016. 49 p.
- ISO 13623:2009 «*Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems*», NEQ. Switzerland, 2009. 11 p.
- Simonov Yu.G., Kruzhalin V.I. *Inzhenernaya geomorfologiya* [Engineering geomorphology]. Moscow, MGU Publ., 1993. 208 p.
- Mohitpour M., Golshan H., Murray A. *Pipeline Design & Construction: a Practical Approach*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, ASME Press, 2003. 656 p.
- Volkov A.V. *Inzhenerno-geomorfologicheskaya otsenka usloviy stroitelstva gazotransportnykh sistem v Leningradskoy oblasti*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Engineering geomorphological assessment of conditions for gas transporting system construction in Leningrad Region. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2009. 24 p.
- Kuzmin S.B. Risk assessment for natural resource management in the subjects of Russian Federation. *Georisk*, 2016, no. 2, pp. 30–37. In Rus.
- Abspoel L., Courage W., Dabekaussen W., de Bruijn R., Kruse H., Wiersma A.P., Hijma M.P., van den Heuvel F., van den Broeck W. Risk-based asset management: automated structural reliability assessment of geographically distributed pipeline networks for gas and water in the Netherlands. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2018, vol. 14, no. 7, pp. 928–940.
- Aloqaily A. *Cross Country Pipeline Risk Assessments and Mitigation Strategies*. Houston, Gulf Professional Publishing, 2018. 198 p.
- Bai M., Du Y., Chen Y., Xing Y., Zhao P. Risk Assessment of Long Gas and Oil Pipeline Projects Inducing Landslide Disasters during Construction. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2017, vol. 31, no. 5, p. 04017063 (1–7).
- Ermolaeva A.V. Application of groundwater aggressiveness assessment method for estimation of the karst process at main gas pipeline construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2016, vol. 33, pp. 012049 (1–7).
- Erwin S.O., Schmidt J.C., Allred T.M. Post-project geomorphic assessment of a large process-based river restoration project. *Geomorphology*, 2016, vol. 270, pp. 145–158.
- Geach M.R., Stokes M., Hart A. The application of geomorphic indices in terrain analysis for ground engineering practice. *Engineering Geology*, 2017, vol. 217, pp. 122–140.
- Shabarchin O., Tesfamariam S. Risk assessment of oil and gas pipelines with consideration of induced seismicity and internal corrosion. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, vol. 47, pp. 85–94.
- Chernomorets L.S. Criteria for engineering evaluation of relief in construction of gas pipeline systems. *Natural and technical Sciences*, 2015, no. 9, pp. 81–87. In Rus.
- Geografiya Saratovskoy oblasti* [Geography of the Saratov Region]. Ed. by S.G. Voskresenky. Saratov, Detskaya Kniga Publ., 1997. 224 p.
- Natsionalny atlas Rossii. T. 2. Priroda i ekologiya* [National Atlas of Russia. V. 2. Nature and Environment]. Moscow, Roskartografiya Publ., 2008. 495 p.
- Atlas Saratovskoy oblasti* [Atlas of the Saratov region]. Ed. by V.G. Lebedev. Moscow, GUGK Publ., 1978. 31 p.
- Ataev S.S., Danilov N.N., Pryanin B. V. *Tekhnologiya stroitel'nogo proizvodstva* [Construction technology]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984. 559 p.
- GOST 25100–2011. *Grunty. Klassifikatsiya* [State Standard 25100–2011. Soils. Classification]. Moscow, MNTKS Publ., 2013. 63 p.
- Jarvis A., Rubiano J., Nelson A., Farrow A., Mulligan M. *Practical use of SRTM data in the tropics: Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data*. Cali, CO, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2004. 32 p.

22. Karwel A., Ewiak I. Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII, P. B7. Beijing, 2008. pp. 169–172.
23. Karionov Yu.I. Otsenka tochnosti matritsy vysot SRTM [Evaluation of SRTM height matrix accuracy]. *Geoprofi*, 2010, no. 10, pp. 48–51. In Rus.
24. Voskresensky S.S. *Geomorfologiya Sibiri (ploskogorya i nizmenosti Vostochnoy Sibiri, gory Yuzhnoy Sibiri)* [Geomorphology of Siberia (plateaus and lowlands of Eastern Siberia, mountains of Southern Siberia)]. Moscow, Moscow State University Publ., 1957. 315 p.
25. Simonov Yu.G., Simonova T.Yu. Fundamental problems of anthropogenic geomorphology. *Geomorphology*, 2013, no. 3, pp.3–11. In Rus.
26. Timofeev D.A. *Relefoobrazovanie prirodnoe i antropogennoe: razlichiya istinnye i mnimye* [Natural and anthropogenic relief formation: true and imaginary differences]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, 1995, no. 6, pp. 124–126.

*Received: 10 September 2018.*

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

**Lev S. Chernomorets**, applicant, Lomonosov Moscow State University.

УДК 67.08:65.011.56

## ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ ОТХОДОВ В РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Маковкин Владимир Иванович<sup>1</sup>,  
assorti2030@yandex.ru

Замятин Николай Владимирович<sup>1</sup>,  
zamnv@gmail.com

Смирнов Геннадий Васильевич<sup>1</sup>,  
smirnov@main.tusur.ru

<sup>1</sup> Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

**Актуальность.** Проблема охраны окружающей среды является одной из острейших проблем настоящего времени. Многогранное замусоривание всех геосфер неупотребленными отходами привело к резкому ухудшению состояния экологических систем, к гибели некоторых уникальных природных комплексов, к сокращению и исчезновению популяций отдельных видов растений и животных, к опасности непредсказуемых необратимых последствий, к которым могут привести результаты техногенной деятельности человека. Поэтому утилизация техногенных отходов производств, а тем более использование их в ресурсосберегающих технологиях, безусловно, весьма актуальны.

**Цель работы:** показать возможность утилизации, контроля и использования отходов производств, в частности фторангидрита, в ресурсосберегающих строительных технологиях.

**Методы:** химическая нейтрализация отходов, дезинтеграция сырья и получение из него сыпучего клинкерного материала, способы его контроля и применения в разнообразных рецептурах в строительных технологиях; лазерное сканирование поверхности полученной сыпучей смеси; аппроксимация модели поверхности с применением радиальных базисных функций нейронных сетей; создание модели нелинейной функции поверхности по теореме Колмогорова с применением суперпозиции радиальных базисных функций; вычисление объема вещества, ограниченного полученной функцией с применением кубатурной функции методом Гаусса–Кронрода и методом Монте-Карло.

**Результаты.** Рассмотрена технология нейтрализации сульфаткальциевых отходов производства и технологическая схема его дезинтеграции и использования в буровых растворах. Представлена система контроля объема дезинтегрированного вещества, необходимая для учета его количества и дозирования при использовании в рецептурах различных технологий. Показано, что при контроле и оценке количества дезинтегрированного вещества лучшим является способ с аппроксимацией нелинейной функции, так как имеется возможность регулирования ошибки количеством разбиений функции или количеством опытов, а также учитывается модель поверхности вещества. Использование радиальных базисных функций нейронной сети целесообразно для получения модели поверхности сыпучих веществ с целью повышения точности измерения объемов в резервуарных парках и складах производственных предприятий. Наиболее эффективными являются методы моделирования функций поверхности и измерения их объема методами квадратур или Монте-Карло. Использование метода Гаусса–Кронрода в данном случае предпочтительно.

### Ключевые слова:

Производственные отходы, ресурсосберегающие технологии, резервуар, уровень, объем, сыпучий материал, нейронные сети, сети радиальных базисных функций, квадратурные функции, аппроксимирующая функция, интерполяционная функция, Matlab.

### Введение

Одним из распространенных видов промышленных отходов химической промышленности являются сульфаткальциевые отходы, которые в значительной мере загрязняют окружающую среду.

В Обском бассейне России и Казахстана сульфаткальциевые отходы образуются на следующих промышленных предприятиях: ОАО «СХК», г. Томск; ОАО «Галополимер», г. Пермь; ОАО «Полевской криолитовый завод», г. Полевской, Свердловская обл.; АО «УМЗ», г. Усть-Каменогорск, Казахстан.

В процессе хозяйственной деятельности ОАО «СХК» образуется сульфаткальциевый отход – фторангидрит – в количестве (тонн в год) 13500, ОАО «Галополимер» – 70000, ОАО «Полевской криолитовый завод» – 200000, АО «УМЗ» – 17000.

Фторангидрит образуется при получении фтороводорода в присутствии избытка серной кислоты, поэтому его необходимо нейтрализовать щелочным реагентом для перевода в твердое безопасное состояние. Для того чтобы полученный твердый материал не выбрасывать на свалку, загрязняя окружающую среду, а использовать его во благо людям, в частности, в ресурсосберегающих технологиях, его дезинтегрируют и хранят в специальных силосах. Обезвреженный по сухому способу фторангидрит, а также техногенный ангидрит, модифицированный солями одновалентных металлов, обладают весьма востребованными в строительной промышленности качествами пластификатора, ангидритового вяжущего, пигмента, наполнителя. Например, фторангидрит подходит для изготовления сухих строительных смесей,

гипсоволокнистых листов (ГВЛ), гипсокартонных листов (ГКЛ), гипсовых плит и блоков, и пр. [1–6].

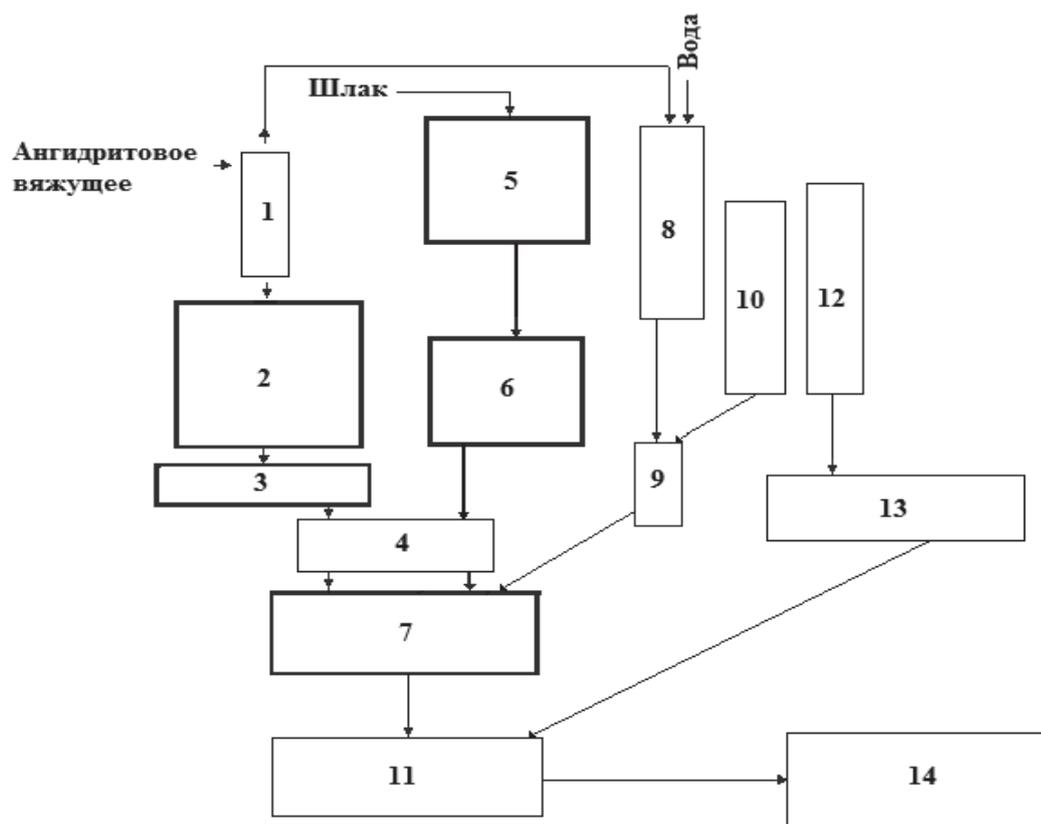
Для хранения и использования материалов на предприятиях используется совокупность различных резервуаров, называемых резервуарным парком, который должен эксплуатироваться максимально эффективно при минимальных затратах. Актуальной задачей в данной области является создание технологий по преобразованию и применению техногенных отходов, в частности фторангидрита, и быстрое получение точной информации об имеющихся на предприятии объемах этих веществ, а также о динамике их применения [7].

#### Технологическая схема нейтрализации и дезинтеграции фторангидрита

Учеными Томского политехнического университета был разработан и внедрен в производство уникальный способ возведения помещений различного назначения (гаражные боксы, склады, киоски и пр.). Производство состоит из следую-

щих этапов: изготовление металлического каркаса, обнесение каркаса съемной опалубкой, заливка межопалубочного пространства строительной смесью из техногенных отходов: фторангидрита и золошлака. Золошлак выступает в качестве инертного материала. Из фторангидрита  $\text{CaSO}_4$  получают ангидритовое вяжущее [8]. Ангидритовое вяжущее – это унифицированный ангидрит (нейтрализованный, усредненный по массе, классифицированный по фракциям и модифицированный сульфатом 1-го валентного металла, предпочтительно  $\text{K}_2\text{SO}_4$  в количестве 1,5 % от общей массы фторангидрита). После кристаллизации (схватывания смеси) двухводного гипса  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  и снятия опалубки готовые модули транспортируются и монтируются по месту строительства [9–11].

Кроме производства каркасно-монолитных помещений выпускается унифицированный техногенный ангидрит и ангидритовое вяжущее; листы «ПАНО» (Панелей Ангидритовых Отделочных); профильные строительные изделия типа «швел-



**Рис. 1.** Технологическая схема изготовления ангидритовых каркасно-монолитных модулей: 1 – циклон; 2 – расходный бункер ангидритового вяжущего; 3 – шнек-дозатор ангидритового вяжущего; 4 – скип; 5 – расходный бункер золошлака; 6 – шнек-дозатор золошлака; 7 – растворо-бетоно-смеситель; 8 – абсорбер; 9 – дозатор воды; 10 – расходная емкость с водой; 11 – площадка изготовления каркасно-монолитных модулей; 12 – склад хранения металлопроката и съемной опалубки; 13 – площадка изготовления металлического каркаса модуля; 14 – склад полуфабрикатной продукции – каркасно-монолитных модулей помещений

**Fig. 1.** Technological scheme for manufacturing anhydrite frame-monolithic modules: 1 is the cyclone; 2 is the consumption bunker of anhydrite binder; 3 is the auger screw of anhydrite binder; 4 is the skip; 5 is the consumption bunker of ash-and-slag; 6 is the auger screw of ash-and-slag; 7 is the concrete mixer for mortar; 8 is the absorber; 9 is the water batcher; 10 is the tank with water; 11 is the area for manufacturing frame-monolithic modules; 12 is the storage warehouse for rolled metal products and removable formwork; 13 is the area for manufacturing metal framework of the module; 14 is the warehouse of semi-finished products – frame-monolithic modules of buildings

лер», используемые при возведении несъемной опалубки, ограждений территорий, межкомнатных перегородок и пр. Наиболее экономически эффективной из вышеперечисленных продукций являются листы «ПАНО», по своим характеристикам превосходящие гипсокартонные и гипсоволокнистые листы фирмы «Knauf».

Процесс нейтрализации фторангидрита осуществляется гидроксидом кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  по реакции 1:



Технологическая схема изготовления ангидритовых каркасно-монолитных модулей показана на рис. 1.

Первоначально из цеха подготовки унифицированного фторангидрита по пневмопроводу через циклон – 1 подается ангидритовое вяжущее (АВ) в расходный бункер – 2 ангидритового вяжущего. Из бункера – 2 посредством шнека-дозатора – 3 ангидритовое вяжущее поступает в скип – 4. Просеянный золошлак (фракцией менее 20 мм) разгружают грузовым транспортом в расходный бункер – 5 и при помощи шнека-дозатора – 6 подают также в скип – 4, из которого сыпучие материалы поступают в раствор-бетоносмеситель (РБС) – 7. В РБС – 7 из емкости – 10 через дозатор – 9 подается вода. Запыленный воздух после циклона – 1 поступает в водяной абсорбер – 8, что обеспечивает безотходность производства. После завершения наполнения бункера – 2 циркуляция воды через абсорбер – 8 прекращается и пульпа (взвесь ангидрита в воде) направляется через дозатор – 9 в РБС – 7. После смешения исходных ингредиентов полученный ангидритошлаковый бетон заливают в межопалубочное пространство многократно используемой съемной опалубки предварительного смонтированного вокруг металлического каркаса на площадке изготовления модуля – 11. Каркас модуля изготавливают на площадке производства металлического каркаса модуля – 13 из металлопроката, заранее привезенного на склад – 12.

Актуальной проблемой на всех этапах производства является определение объема вещества и получаемых смесей в бункерах (или, возможно, других резервуарах).

#### Актуальность проблемы

Для определения объема веществ на практике применяют несколько способов. Самый простой из них – это определение объема вручную простукиванием или буйковым методом. Однако чаще используют цифровые и аналоговые уровнемеры [12–14]. Если вещество сыпучее, вязкое или имеет другую консистенцию, отличную от жидкой, то оно образует неровную поверхность, выпуклой или вогнутой формы (в зависимости от того, наполняется резервуар или из него откачивается смесь). Искривленная поверхность материала может возникать в результате его сил сцепления с поверхностью резервуара, что приводит к его налипанию к

стенкам резервуара (рис. 2). В подобной ситуации объем смеси в резервуаре вычисляется по усредненному или другому доступному (обычно уровень находится в фиксированном положении и может измерять значения только в определенном месте) значению уровня. Такое определение объема имеет большие погрешности, нарастающие с каждым контролируемым резервуаром.

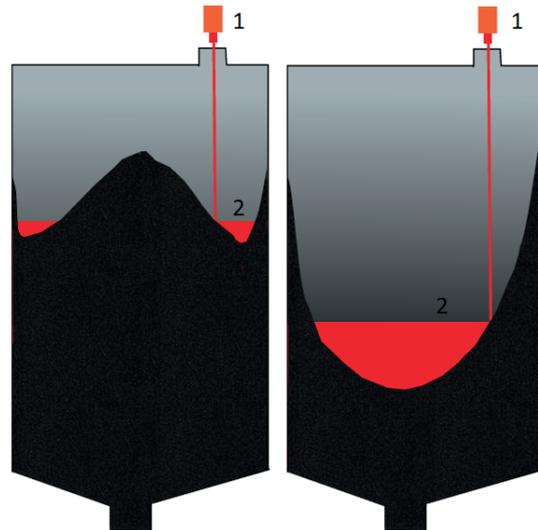


Рис. 2. Форма поверхности при наполнении или откачке вещества в резервуаре: 1 – уровнемер; 2 – поверхность вещества: черное – реальная поверхность, красное – предполагаемая поверхность, под которой обычно осуществляется измерение объема

Fig. 2. Shape of surface while filling or pumping out the substance in the silo: 1 is the level gauge; 2 is the surface of substance: black – real surface, red – the assumed surface under which the volume measurement is usually carried out

Из-за недостаточной точности определения объемов веществ в резервуарах на предприятиях возникают следующие проблемы:

- низкая скорость сбора, передачи и анализа данных о количестве веществ на резервуарных парках, которая особенно актуальна, если парки распределены на всем предприятии или находятся в разных регионах;
- низкая точность получаемых данных о количестве веществ на резервуарных парках;
- простой из-за неверных расчетов динамики использования или производства сырья;
- низкое качество получаемых смесей из-за погрешностей при расчете процентного соотношения веществ в различной рецептуре;
- дополнительные затраты из-за сопутствующих ошибок в бухгалтерии, неверных расчетов объемов производства, динамики использования сырья и т. д.;
- низкая культура труда в резервуарных парках. Объем веществ в резервуарах может вычисляться разными способами [15], такими как:
  - *визуальный метод* – замеры на глаз, простукивание резервуара, использование буйков, лине-

ек и тому подобных вспомогательных устройств. Наименее точный метод, погрешность которого может составлять до 30 %;

- *теоретический расчет* – расчет разницы количества поступающего и вывозимого материала. Подобные измерения редко применяют на практике, так как их невозможно использовать при производстве смесей и любых других операциях, требующих точных значений объемов;
- *маркшейдерский замер* – использование специализированных знаний, свойств сыпучих материалов, реологических свойств веществ и значений высоты вершины горки и ее диаметра. На основе полученных данных прорабатывается формула и по ней рассчитывается объем;
- *лазерное сканирование поверхности* – использование системы уровнемеров или подвижных уровнемеров для измерения высот в различных точках, моделирование поверхности в виде нелинейной функции и затем вычисление объема, ограниченного этой поверхностью.

Выбор определенного метода измерения объема базируется на разных факторах и зависит от требуемой точности. Потенциально, меньшую погрешность имеет метод построения трехмерных поверхностей веществ со значениями уровня в каждой точке.

#### Постановка задачи

С целью повышения точности определения объемов сыпучих веществ в резервуарах необходимо проанализировать способы определения объемов под нелинейной поверхностью, обосновать наиболее вероятную аппроксимацию функции поверхности, исследовать возможность применения аппроксимации посредством нейронных сетей и криволинейных интегралов, выполнить экспериментальную проверку. Для выполнения поставленной задачи предложена следующая последовательность действий:

- 1) получение дискретного количества координат уровней поверхности вещества;
- 2) аппроксимация поверхности модели для получения промежуточных неизвестных значений координат и ее нелинейной функции;
- 3) вычисление объема вещества под образуемой поверхностью.

#### Аппроксимация модели поверхности сыпучего вещества

Чаще всего для моделирования поверхности по известным координатам применяют математические модели построения рельефа, в частности аппроксимацию высот между смежными точками модели. Тогда задача определения уровня на поверхности координат решается нахождением в каждом случае трех смежных исходных точек модели, между которыми должна находиться соответствующая искомая точка, определением коэффициентов уравнения плоскости, проходящей через эти три точки, вычислением по полученному уравнению высоты [16].

Более универсальными являются статистические модели – «плавающего квадрата» и «плавающего круга», которые описаны в работе [17].

Для математического моделирования поверхностей предложено использовать нейронные сети, обладающие высокой скоростью и точностью получаемых моделей.

В работах [16, 18] проведены сравнения различных нейронных сетей, в том числе и для аппроксимации входных значений. Сравнение точностей выходов нейронных сетей в работе [18] проводилось по коэффициентам детерминации, представленным в табл. 1.

**Таблица 1.** Качество аппроксимации по коэффициенту детерминации

**Table 1.** Quality of approximation by the determination coefficient

Наименование Title	GRNN сеть GRNN network	РБФ сеть RBF network	Линейная сеть Linear neural network
Коэффициент Coefficient ( $R^2$ )	0,9473	0,9918	0,6422

Другие модели, используемые для сглаживания функции по точкам, такие как ряды Фурье и мультипликативные модели, имеют следующие коэффициенты детерминации:

- ряды Фурье: 0,8747;
- мультипликативные модели: 0,7262.

Из приведенных данных видно, что лучше всего для аппроксимации поверхностей использовать РБФ и GRNN нейронные сети. При использовании РБФ сети получен коэффициент детерминации  $R^2=0,9918$ . Это означает, что реальный выход нейросети и желаемый выход (что по смыслу совпадает с оценочными и реальными значениями) практически совпадают. Применяя аналитические или численные методы, практически невозможно достичь такого высокого значения коэффициента детерминации. В плане скорости выполнения операций и обучения сети для аппроксимации модели поверхности лучше подходят РБФ сети, так как они не имеют второго промежуточного слоя, отвечающего в GRNN за оценку взвешенного среднего.

Таким образом, для аппроксимации данных по известным координатам уровня целесообразно применение нейронных сетей, в частности РБФ сети, которая обеспечивает высокое качество аппроксимации и может использоваться для моделирования поверхности веществ.

Рассмотрим способ применения нейронных сетей для моделирования поверхности сыпучих веществ.

В 1956 г. Колмогоровым было доказано, что любая непрерывная функция может быть реализована в виде суперпозиции функций меньшей размерности [19]. Неявная функция трехмерной поверхности может быть представлена в виде (2):

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^n \omega_i \varphi(r), \quad (2)$$

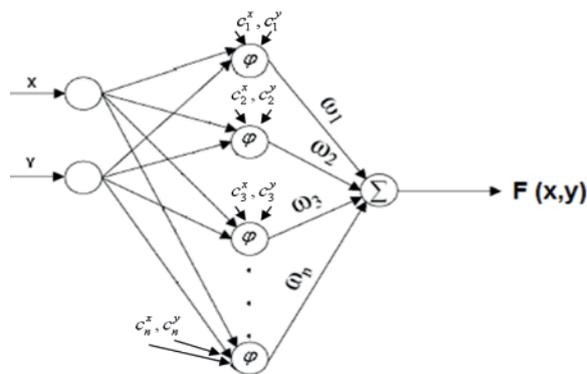
где  $\omega_i$  – константы;  $\varphi(r)$  – радиально-базисная функция.

В качестве функции  $\varphi(r)$  можно выбрать любые радиально-базисные функции (3), которые широко используются для решения задач многомерной интерполяции и аппроксимации

$$\varphi(x, y, c_i^x, c_i^y) = 1 - \sqrt{(x - c_i^x)^2 + (y - c_i^y)^2}, \quad (3)$$

где  $c_i^x, c_i^y$  – некоторые константы, называемые ядрами РБФ.

Неявная функция поверхности может быть реализована с помощью нейронной сети, состоящей из двух слоев: скрытого нелинейного слоя, имеющего  $n$  нейронов и выходного линейного слоя, имеющего один нейрон, который передает на выход взвешенную сумму выходов нейронов первого слоя. Структура такой нейронной сети представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Нейронная сеть РБФ:  $x, y$  – координаты точек поверхности вещества;  $c_i^x, c_i^y$  – ядра РБФ;  $\varphi$  – активационная радиальная базисная функция;  $\omega_i$  – веса синапсов;  $F(x, y)$  – функция зависимости уровня от входных координат  $x, y$

**Fig. 3.** RBF neural network:  $x, y$  are the coordinates of substance surface points  $c_i^x, c_i^y$  are the RBF cores;  $\varphi$  is the activation radial basis function;  $\omega_i$  are the synaptic weights;  $F(x, y)$  is the function of level dependence on input coordinates  $x, y$

Алгоритм обучения нейронной сети с использованием РБФ выглядит следующим образом:

- выбирают число нейронов в скрытом слое, равное количеству входных точек;
- для каждого нейрона задают ядро РБФ ( $c_i^x, c_i^y$ ) таким образом, что  $c_i^x = x_i, c_i^y = y_i$ ;
- определяют веса  $\omega_i$ .

Выходное значение сети для  $i$ -х входных данных определяется по формуле (4)

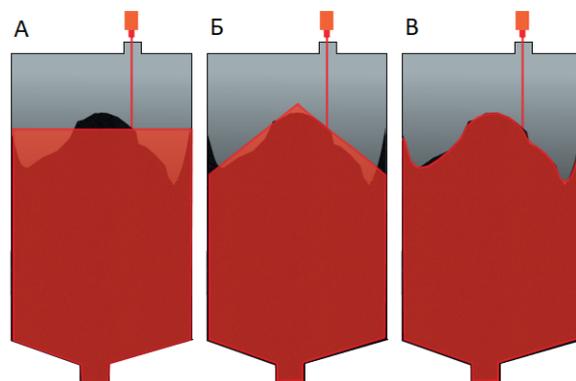
$$D_i = w_1 f(x_i, y_i, c_1^x, c_1^y) + w_2 f(x_i, y_i, c_2^x, c_2^y) + \dots + w_n f(x_i, y_i, c_n^x, c_n^y). \quad (4)$$

Таким образом, рельеф поверхности представлен в виде нелинейной функции – суперпозиции РБФ обученной нейронной сети. Затем объем рассматриваемого вещества можно определить, решив двойной или тройной интеграл уже известной функции.

### Способы измерения объема

Погрешность вычислений объема зависит только от неровностей поверхности, так как объем смесей ниже минимального уровня поверхности смеси всегда одинаковый и определяется формой и размерами резервуара, независимо от значений других уровней. Объем вещества может быть измерен следующими способами.

*Измерение объема по гладкой поверхности* осуществляют по уровню в определенном месте (рис. 4, А). В этом случае для правильного определения объема необходима информация о характеристиках резервуара и уровня материала или сырья, получаемого с помощью уровнемера. Предполагается, что поверхность смеси гладкая и уровень смеси в любом месте остается неизменным, как если бы измерялся объем жидкости [20, 21].



**Рис. 4.** Графическое представление способа измерения объема вещества (А) по гладкой поверхности, (Б) по конусу, (В) по нелинейной функции поверхности

**Fig. 4.** Graphical representation of the method for measuring the volume of the substance (А) by a smooth surface, (Б) by the cone, (В) by the nonlinear function of the surface

Объем вычисляется по формуле объема цилиндра (5), если используется вертикальный цилиндрический резервуар:

$$V = \pi r^2 h, \quad (5)$$

где  $r$  – радиус резервуара;  $h$  – уровень смеси.

При использовании резервуаров иных видов необходимо выбрать другую формулу, например, объем усеченного цилиндра, если смесь хранится в горизонтальном резервуаре цилиндрической формы. Данный способ остается самым простым, чаще всего именно его используют при измерениях вручную, так как он является самым быстрым из рассмотренных и не требует сложных расчетов. Но, применяя его, игнорируются реологические и сыпучие свойства смесей, и точность подобного способа самая низкая из предложенных выше.

*Измерение объема по конусу* – вычислить объем по уровню вещества в определенном месте и моделируемому конусу или конусовидному углублению (при наполнении и откачке соответственно) с углом между образующими и основанием ко-

нуса, равным углу естественного откоса соответствующего материала (рис. 4, Б). Необходимы характеристики резервуара, координаты положения лазерного уровнемера и получаемые им значения уровня, угол естественного откоса используемого материала или смеси. Угол естественного откоса (иногда также угол внутреннего трения, угол ската) – угол, образованный свободной поверхностью рыхлой горной массы или иного сыпучего материала с горизонтальной плоскостью (рис. 5).



Рис. 5. Форма поверхности и угол естественного откоса гравия

Fig. 5. Shape of surface and gravel repose angle

Кроме этого, достаточно знать место наполнения/откачки смеси, которое может совпадать с вершиной конуса, и характеристики корпуса резервуара, ограничивающие конус. Для примера объем образуемой материалом «горки» в вертикальном цилиндрическом резервуаре можно рассчитать с помощью формулы (6):

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 h_{\text{осн}}, \quad (6)$$

где  $r$  – радиус резервуара;  $h_{\text{осн}}$  – высота «горки» сыпучего материала.

Положение уровнемера может быть ограничено из-за конструкции резервуара, например, он может быть помещен только в отверстии выхода воздуха, так как резервуар имеет закрытую форму и нет возможности его установки непосредственно над вершиной конуса. Но, определив угол естественного откоса и характеристики резервуара, можно определить высоту «горки», пользуясь правилом прямоугольного треугольника, и получить формулу (7):

$$h_{\text{осн}} = r \tan \alpha, \quad (7)$$

где  $r$  – радиус резервуара;  $\alpha$  – угол естественного откоса сыпучего материала.

Использование угла естественного откоса и вычисления объема конуса значительно увеличивает точность по сравнению с измерением объема по гладкой поверхности, но имеются следующие недостатки:

- требуется больше данных и предварительные математические расчеты перед эксплуатацией на различных типах резервуаров;
- угол естественного откоса варьируется в зависимости от влажности, типа сыпучего материала

и времени (возможны оседание материала, уменьшение пористости, влияние влажности во времени и т. д.) и требует предварительных вычислений с помощью специальных приборов;

- угол между основанием и рыхлой массой равен углу естественного откоса только при наполнении или откачке из резервуара, но между этими состояниями при переходах от первого процесса ко второму и наоборот, угол также будет меняться.

*Измерение объема по нелинейной функции поверхности* – вычисление объема по дискретному количеству координат уровней и по моделируемой нелинейной функции, описывающей поверхность сыпучего материала с определенной точностью (рис. 4, В). Необходимы характеристики резервуара и модель поверхности в виде ее нелинейной функции.

Объем вещества можно найти, используя двойной интеграл известной функции поверхности, ограниченной на заданном пространстве, или применить метод Монте-Карло.

Определить объем вещества в вертикальном цилиндрическом резервуаре можно, исходя из геометрического смысла двойного интеграла. Если функция  $f(x,y)$  принимает в области  $D$  только положительные значения, двойной интеграл данной функции численно равен объему  $V$  вертикального цилиндрического тела, построенного на основании  $D$  и ограниченного сверху соответствующим куском поверхности  $z=f(x,y)$  (8).

$$V = \iint_D z dx dy. \quad (8)$$

Вычисление значений интегралов возможно двумя распространенными способами:

- использованием квадратурных или кубатурных формул;
- использованием метода Монте-Карло.

#### Экспериментальные результаты

Возможность использования предложенной методики проверялась экспериментально на макете вертикального цилиндрического резервуара, и в качестве измеряемого материала использовался цемент М400. Для измерения значений уровня использовалась цилиндрическая система координат с осью  $Oz$ , проходящей через центр модели. В реальных условиях на вход РБФ нейронной сети можно подавать неравномерно распределенные данные, но для упрощения исследовательской работы точки расположены на равных расстояниях друг от друга, значения уровня измерялись на одинаковых интервалах  $\varphi$  и  $r$  друг от друга.

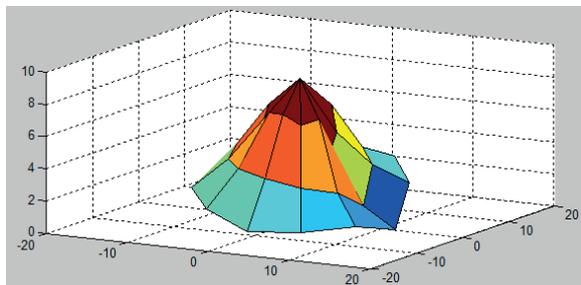
В качестве измерителя уровня использовался лазерный дальномер SICK DT50 (погрешность  $\pm 1$  мм). Диаметр резервуара: 23,28 см. Шаг по  $r$ : 3,88 и 1,94. Шаг по  $\varphi$ : 30 и 15 градусов. Фрагмент полученных данных представлен в табл. 2.

Графический пример полученных данных представлен на рис. 6.

**Таблица 2.** Координаты уровней, полученные с поверхности цемента

**Table 2.** Coordinates of levels obtained from the surface of cement

$\varphi$ , град \r, см / $\varphi$ , deg \r, cm	0	3,9	7,8	11,7
0	9	4,7	1,3	0
30	9	5,4	3,4	2,3
60	8,6	6,9	4,1	3,3
90	8,5	7,1	4,1	3,3
120	8,6	7	4,7	3,3
150	8,6	6	4	3,4
180	9	7	4,3	2
210	9	6,3	3,8	2
240	8,6	6,9	3,6	1,3
270	8,5	6,9	3,3	0,4
300	8,6	6,3	2,8	0,5
330	8,6	6,6	2,4	0,7



**Рис. 6.** Графическое представление полученных данных

**Fig. 6.** Graphical representation of the data obtained

Так как применяемая радиально базисная функция не работает с цилиндрическими координатами напрямую из-за евклидова расстояния между центром и точками, проведена замена переменных по закону преобразования координат от цилиндрических к декартовым по формуле (9):

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi; \\ y = r \sin \varphi, \end{cases} \quad (9)$$

где  $r$  – полярный радиус;  $\varphi$  – полярный угол.

В качестве активационной функции нейронов используется кубическая РБФ функция (10). Выбор активационной функции подбирался экспериментально при сравнении с реальной поверхностью по внешнему виду полученной модели.

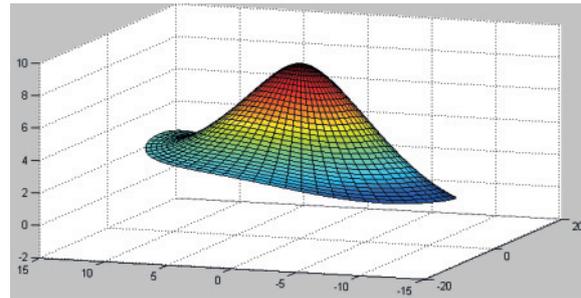
$$a = n^3, \quad (10)$$

где  $n$  – евклидово расстояние от ядра РБФ до координаты входной точки.

При обучении РБФ нейронной сети с нулевой ошибкой количество нейронов скрытого слоя всегда равно числу элементов обучаемого множества (значений, подаваемых на вход сети). С такой ошибкой нельзя получить приемлемого по скорости решения в случае больших размеров обучающего множества и необходимы дополнительные манипуляции с определением оптимальной погрешности получаемой модели. Также нулевая ошибка не дает гарантии, что промежуточные значения, на которых не была обучена нейронная

сеть, дадут точный результат, а чаще наоборот, модель поверхности будет иметь сложную форму, отличающуюся от реальной.

При обучении нейронной сети с погрешностью менее одного процента для аппроксимации поверхности в данном эксперименте оказалось достаточно двенадцати нейронов. При обеспечении точности порядка 99 процентов этого достаточно. Пример работы нейронной сети с кубической активационной функцией изображен на рис. 7. Скорость и точность обучения сети изображена на рис. 8.



**Рис. 7.** Пример использования кубической активационной функции в нейронной сети

**Fig. 7.** Use of cubic activation function in a neural network

При оптимизации процесса обучения нейронной сети время обработки данных составляет десятые доли секунды и этого достаточно при использовании этого способа на резервуарных парках.

В статье исследуется поверхность в статическом состоянии (не учитывая влияние засыпания или откачки в динамике). Внимание уделяется измерению объема «горки», образованной веществом (объем смеси под ней остается неизменным) и значения уровня оцениваются от ее нижней границы. Объем смеси под горкой  $V_{\text{оч}}$  рассчитывается по формуле объема вертикального цилиндра.

Измерение объема по гладкой поверхности осуществлялось по среднему уровню вещества с гладкой поверхностью, угол естественного откоса равен 40–50°. Для проверки достоверности данных значений оценены углы поверхности песка по касательной в каждой точке, из-за неровностей и комковатости поверхности средний угол получился равным 39°. Проверка показала, что полученные значения соответствуют табличным и в качестве угла естественного откоса выбран угол в 40°. В способе измерения объема по нелинейной функции двойной интеграл вычислялся методом Гаусса–Кронрода. Оценка погрешностей способов представлена в табл. 3.

**Таблица 3.** Погрешность способов измерения объема

**Table 3.** Error of ways of measuring the volume

Гладкая поверхность Flat surface	Конус Cone	Нелинейная функция Nonlinear function
%		
25,8	21,7	8

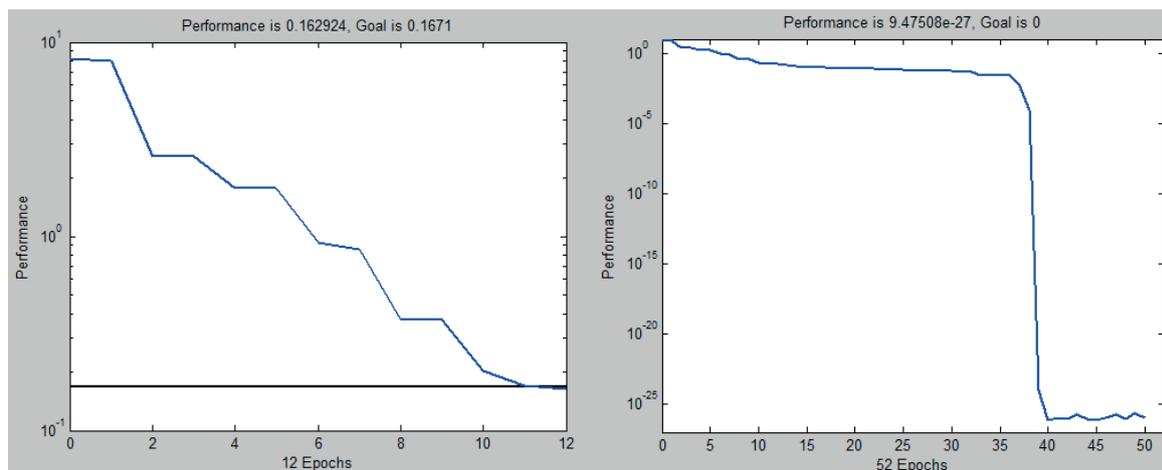


Рис. 8. Графики обучения РБФ нейронной сети с ошибкой 0,16 (слева) и нулевой ошибкой (справа)

Fig. 8. Graphs of training RBF neural networks with an error of 0,16 (left) and zero error (right)

### Заключение

По результатам экспериментов выяснено, что объем веществ можно вычислить каждым из этих способов. Наибольшую ошибку имеет способ измерения объема по гладкой поверхности и чуть меньшую – по конусу. Проведя более подробный анализ характеристик смесей и разработав соответствующие формулы, можно увеличить точность измерений по конусу, но останутся его главные недостатки – узкая направленность на исследуемый тип смеси и трудоемкость исследовательской части.

Исходя из данных в табл. 3 и аналитически, из имеющихся трех способов лучшим является способ с аппроксимацией нелинейной функции, так как имеется возможность регулирования ошибки количеством разбиений функции или количеством опытов, а также учитывается модель поверхности вещества.

Использование РБФ нейронной сети целесообразно для получения модели поверхности сыпучих веществ с целью повышения точности измерения

объемов в резервуарных парках и складах производственных предприятий. Посредством РБФ сетей возможно аппроксимировать любые поверхности, если известны координаты их точек, вне зависимости от интервалов между ними. Можно также увеличить точность вычисления, рассмотрев точки, лучше всего характеризующие поверхность (точки в местах перехода поверхности от понижения к повышению уровня, точки с максимальными и минимальными уровнями и так далее). По этим причинам данный способ лучше подходит для точного измерения объема.

Наиболее эффективными являются методы моделирования функций поверхности и измерения их объема методами квадратур или Монте-Карло, так как они имеют наименьшую погрешность, исходя из полученных результатов. Использование метода Гаусса–Кронрода в данном случае предпочтительно, так как при разнице числа операций в тысячи раз его точность остается в несколько раз больше.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fedorchuk Yu.M., Zykova N.S., Mikheev V.N. The multipurpose use of industrial wastes in the process of producing anhydrite construction materials // Strategic Technology (IFOST), 2012 7<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology (IFOST). – Tomsk, Russia, 2012. – 3 p.
2. Research of Gypsum-Containing Raw Materials for Obtaining of Dry Building Mixes / L. Anikanova, O. Volkova, I. Guseva, A. Kurmangalieva // Key Engineering Materials. – 2015. – V. 683. – P. 295–300.
3. Gutt W. Manufacture of cement from industrial byproducts // Chemistry and Industry. – 1971. – № 7. – P. 189–197.
4. Garkavi M.S. Anhydrite Floors for Civil Construction // Proc. of the 14<sup>th</sup> Internationale Baustofftagung «Ibausil». – Weimar, Germany, 2000. – P. 865–870.
5. Wang Jinhua, Yang Xinya, Yu Degao. Modification of fluorgypsum as cement retarder // Journal of Wuhan University of Technology-Mater. – 2007. – V. 22. – № 4. – P. 745–748.
6. Ludvigsen K. Production of gypsum boards from gypsum waste // Cim., betons, platres, chaux. – 1998. – № 2. – P. 97–98.
7. Маковкин В.И., Замятин Н.В. Система мониторинга и обработки информации о состоянии резервуарного парка // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19. – № 4. – С. 95–99.
8. Prediction of the properties anhydrite construction mixtures based on neural network approach / Y.M. Fedorchuk, N.V. Zamyatin, G.V. Smirnov, O.N. Rusina, M.A. Sadenova // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – № 881. – 6 p.
9. Федорчук Ю.М. Результаты пуско-наладочных и технологических испытаний производства унификации ангидрита, получаемого из твердых отходов фтороводородного производства Сибирского химического комбината // Химическая промышленность. – 2004. – № 3. – С. 113–115.
10. Малогабаритное здание из бетонной смеси: пат. Рос. Федерация № 35540; заявл. 25.09.2003; опубл. 20.01.2004, Бюл. № 2. – 6 с.
11. Способ контроля параметров сыпучих материалов в резервуарах: пат. Рос. Федерация № 2661314; заявл. 16.05.2017; опубл. 13.07.2018, Бюл. № 20. – 16 с.
12. Намазбаев Т.С., Есенбаев С.Х., Колесников В.А. Средства измерения и контроля технологических процессов на предприятия

- тиях горно-металлургического комплекса. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2012. – 107 с.
13. Якимович Е.А., Замятин Н.В. Моделирование бесконтактного видеоуровнемера с использованием анализа нейронных сетей // Научное издание «Информационные технологии в территориальном управлении, промышленности, образовании»: Сб. статей. – Томск, 2002. – С. 165–170.
  14. Смирнов Г.В., Смирнов Д.Г. Пропитка обмоток электрических машин магнитодиэлектрическим композитом с ультрадисперсным никель-цинковым наполнителем // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – Т. 19. – № 2. – С. 99–102.
  15. Методы измерения объема сыпучих материалов / А.Г. Рыбаков, Е.В. Лукьянова, И.С. Бурмистрова, Ю.Ф. Муратова, М.В. Фёдорова // Энергетические и электротехнические системы: международный сборник научных трудов. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2015. – С. 430–433.
  16. Кулажский А.В. Применение нейронных сетей на основе радиальных базисных функций в моделировании рельефа местности // Вестник РГУПС, Железнодорожный путь и транспортное строительство. – 2009. – Т. 35. – № 3. – С. 95–100.
  17. Обоснование математической модели местности для проектирования автомобильных дорог / Н.Е. Коновалов, Н.Н. Зонна, И.Г. Мельник, А.К. Якимович // Науч. Тр. Гипродорнии. – 1976. – Вып. 18. – 7 с.
  18. Филатова Т.В. Применение нейронных сетей для аппроксимации данных. – Томск: Изд-во Томский гос. университет, 2004. – 30 с.
  19. Колмогоров А.Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных суперпозициями непрерывных функций меньшего числа переменных // Доклады АН СССР. – 1956. – Т. 108. – С. 179–182.
  20. Simultaneous detection of liquid level and refractive index with a long-period fiber grating based sensor device / Y. Huang, B. Chen, G. Chen, H. Xiao, S.U. Khan // Measurement Science and Technology. – 2013. – V. 24 (9). – 095303.
  21. Khaliq S., James S.W., Tatum R.P. Fiber-optic liquid-level sensor using a long-period grating // Opt. Lett. – 2001. – V. 26. – P. 1224–1226.

*Поступила 15.02.2018 г.*

#### **Информация об авторах**

**Маковкин В.И.**, аспирант кафедры автоматизации обработки информации Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

**Замятин Н.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации обработки информации Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

**Смирнов Г.В.**, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.

UDC 67.08:65.011.56

## DISINFECTION AND USAGE OF ANTHROPOGENIC WASTE IN RESOURCE-SAVING CONSTRUCTION TECHNOLOGIES

Vladimir I. Makovkin<sup>1</sup>,  
assorti2030@yandex.ru

Nikolay V. Zamyatin<sup>1</sup>,  
zamnv@gmail.com

Gennady V. Smirnov<sup>1</sup>,  
smirnov@main.tusur.ru

<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,  
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance.** The environmental protection problem is one of the most important one in the present time. Multilateral pollution of all geospheres with non-utilized wastes led to a sharp deterioration of ecological systems, to the death of some unique natural complexes, to the reduction and disappearance of populations of certain plant and animal species, to the danger of unpredictable irreversible consequences which can be the result of man's technogenic activity. That is why the utilization of industrial wastes of industries and their use in resource-saving technologies, of course, are very relevant.

**The aim** of the work is to show the possibility of utilization, control and use of waste products, in particular fluorine-anhydrite in resource-saving construction technologies.

**Methods:** chemical waste neutralization, disintegration of the obtained raw materials and production of bulk clinker material from it, methods of its control and application in various formulations in construction technologies; laser scanning of the surface of the received bulk mixture; approximation of the surface model using radial basis function neural networks; modeling of a non-linear surface function, by the Kolmogorov theorem, using the superposition of radial basis functions; calculation of the volume of a substance limited by the obtained function using the cubature function by the Gauss–Kronrod method and the Monte Carlo method.

**Results.** The paper considers the technology of calcium sulfate neutralization and technological scheme of its disintegration and use in drilling fluids and introduces the system for controlling the volume of a disintegrated substance, which is necessary to account its quantity and dosing when used in formulations of various technologies. It is shown that when controlling and estimating the amount of a disintegrated substance, the best way is to approximate the nonlinear function, since it is possible to control the error by the number of partitions of the function or the number of experiments, and also the model of the surface of the substance is taken into account. The usage of the radial basis function neural network is advisable for obtaining a model of the surface of bulk materials in order to improve the accuracy of measuring volumes in silo farms and warehouses of manufacturing enterprises. Methods of modeling surface functions and measuring their volume by quadrature or Monte Carlo methods are the most effective ones. Usage of the Gauss–Kronrod method in this case is preferable.

### Key words:

Industrial waste, resource-saving technologies, silo, level gauge, volume, bulk material, neural network, Radial Basis Function neural network, quadrature, approximating function, interpolating function, Matlab.

### REFERENCES

1. Fedorchuk Yu.M., Zykova N.S., Mikheev V.N. The multipurpose use of industrial wastes in the process of producing anhydrite construction materials. *Strategic Technology (IFOST)*. 7<sup>th</sup> International Forum. Tomsk, Russia, 2012. 3 p.
2. Anikanova L., Volkova O., Guseva I., Kurmangalieva A. Research of Gypsum-Containing Raw Materials for Obtaining of Dry Building Mixes. *Key Engineering Materials*, 2015, vol. 683, pp. 295–300.
3. Gutt W. Manufacture of cement from industrial byproducts. *Chemistry and Industry*, 1971, no. 7, pp. 189–197.
4. Garkavi M.S. Anhydrite Floors for Civil Construction. *Proc. of the 14<sup>th</sup> Internationale Baustofftagung «Ibausil»*. Weimar, Germany, 2000. pp. 865–870.
5. Wang Jinhua, Yang Xinya, Yu Degao. Modification of fluorgypsum as cement retarder. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2007, vol. 22, no. 4, pp. 745–748.
6. Ludvigsen K. Production of gypsum boards from gypsum waste. *Cim., betons, platres, chaux*, 1998, no. 2, pp. 97–98.
7. Makovkin V.I., Zamyatin N.V. System for monitoring and processing information on the state of the silo farm. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2016, no. 19 (4), pp. 95–99. In Rus.
8. Fedorchuk Yu.M., Zamyatin N.V., Smirnov G.V., Rusina O.N., Sadenova M.A. Prediction of the properties anhydrite construction mixtures based on neural network approach. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, no. 881, 6 p.
9. Fedorchuk Yu.M. The results of commissioning and technological tests of production of anhydrite unification, obtained from solid waste of hydrofluoric production of the Siberian Chemical Combine. *Khimicheskaya promyshlennost*, 2004, no. 3, pp. 113–115. In Rus.
10. Fedorchuk Yu.M., Goryukhin K.E., Manankov A.V., Nedavniy O.I., Erdniev A.I. *Malogabaritnoe zdanie iz betonnoy smesi* [A small-sized building made of concrete mix]. Patent RF, no. 35540, 2004.
11. Smirnov G.V., Zamyatin N.V. *Sposob kontrolja siputshich materjalov v rezervuarach* [Method of control of parameters of loose materials in tanks]. Patent RF, no. 2661314, 2018.
12. Kolesnikov V.A. *Sredstva izmereniya i kontrolya tekhnologicheskikh protsessov na predpriyatiyakh gorno-metallurgicheskogo kompleksa* [Instruments of measurement and control of technological processes at the enterprises of the mining and metallurgical complex]. Karaganda, KarGTU Publ., 2012. 107p.
13. Yakimovich E.A., Zamyatin N.V. Modelirovanie beskontaktnogo videouravnemera s ispolzovaniem analiza neyronnykh setey [Simulation of a contactless video level meter using neural network

- analysis]. *Nauchnoe izdanie «Informatsionnye tekhnologii v territorialnom upravlenii, promyshlennosti, obrazovanii»*. Tomsk, 2002. pp. 165–170.
14. Smirnov G.V., Smirnov D.G. Imbibition of windings of electric machines with a magnetodielectric composite with ultradisperse nickel-zinc filler. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2016, no. 19 (2), pp. 99–102. In Rus.
  15. Rybakov A.G., Lukyanova E.V., Burmistrova I.S., Muratova Yu.F., Fedorova M.V. Methods for measurement of volume of bulk material. *Energeticheskie i elektrotekhnicheskie sistemy*, 2015, vol. 2, pp. 430–433. In Rus.
  16. Kulazhsky A.V. Application of neural networks based on radial basis functions in modeling terrain. *Vestnik RGUPS, Zheleznodorozhny put i transportnoe stroitelstvo*, 2009, no. 3, vol. 35, pp. 95–100. In Rus.
  17. Kononov N.E., Zonnekh N.N., Melnik I.G., Yakimovich A.K. Obosnovanie matematicheskoy modeli mestnosti dlya proektirovaniya avtomobilnykh dorog [Verification of mathematical model of terrain for designing motor roads]. *Nauch. Tr. Giprodormii*, 1976, no. 18, 7 p.
  18. Filatova T.V. *Primenenie neyronnykh setey dlya approksimatsii dannykh* [Application of neural networks for data approximation]. Tomsk, Tomsk State University Press, 2004. 30 p.
  19. Kolmogorov A.N. O predstavlenii nepreryvnykh funktsy neskolkikh peremennykh superpozitsiyami nepreryvnykh funktsy menshego chisla peremennykh [On presentation of continuous functions of several variables by superpositions of continuous functions of fewer variables]. *Doklady AN USSR*, 1956, no. 108, pp. 179–182.
  20. Huang Y., Chen B., Chen G., Xiao H., Khan S.U. Simultaneous detection of liquid level and refractive index with a long-period fiber grating based sensor device. *Measurement Science and Technology*, 2013, vol. 24 (9), 095303.
  21. Khaliq S., James S.W., Tatam R.P. Fiber-optic liquid-level sensor using a long-period grating. *Opt. Lett.*, 2001, vol. 26, pp. 1224–1226.

Received: 15 February 2018.

#### Information about the authors

**Vladimir I. Makovkin**, postgraduate student, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

**Nikolay V. Zamyatin**, Dr. Sc., professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

**Gennady V. Smirnov**, Dr. Sc., professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

**Компьютерная верстка** *О.Ю. Аршинова*  
**Корректурa 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 21.09.2018. Формат 60x84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 20,36. Уч.-изд. л. 18,41.  
Заказ xxx-18. Тираж 500 экз.



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ