

**ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**

---

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

**ИЗВЕСТИЯ  
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 334, № 5, 2023

Издательство  
Томского политехнического университета  
2023

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. 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)  
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)  
Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия)  
Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия)  
Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия)  
Кириянова Л.Г., канд. филос. наук (Россия)  
Строкова Л.А., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Мазуров А.К., д-р геол.-минерал. наук (Россия)  
Боярко Г.Ю., д-р экон. наук, канд. геол.-минерал. наук (Россия)  
Стрижак П.А., д-р физ.-мат. 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, 2023

## 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

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

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей.

Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

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

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

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

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

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

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



**TOMSK  
POLYTECHNIC  
UNIVERSITY**

---

ISSN (print) – 2500\_1019  
ISSN (on\_line) – 2413\_1830

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

Volume 334, № 5, 2023

## EDITORIAL BOARD

Semiletov I.P., editor in chief, 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)  
Belozarov 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)  
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)  
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)  
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)  
Aleksenko 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)  
Tretiak A.Ya., Dr. Sc. (Russia)  
Arbuzov S.I., Dr. Sc. (Russia)  
Kovalev V.Z., Dr. Sc. (Russia)  
Romanenko S.V., Dr. Sc. (Russia)  
Kiryanova L.G., Cand. Sc. (Russia)  
Strokova L.A., Dr. Sc. (Russia)  
Mazurov A.K., Dr. Sc. (Russia)  
Boyarko G.Yu., Dr. Sc., Cand. Sc. (Russia)  
Strizhak P.A., Dr. Sc. (Russia)  
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

## AIMS AND SCOPES

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

The journal was founded in 1903.

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

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

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

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

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

- Geo Assets exploration and refining;
- Geo Assets mining and transportation;
- Geo Assets deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and Geoecology issues;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea;
- Economic and social aspects of using Geo Assets.

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 two 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.



## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

- Магнитно-импульсная обработка для повышения прочностных свойств дефектных участков нефте- и газопроводов**  
Щипачев А.М., Алжадли М.
- Токсичные элементы в подземных водах северных районов Обь-Зайсанской складчатой области**  
Максимова А.А., Черных А.В., Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Деркачев А.С., Сухорукова А.Ф., Никитенков А.Н., Хвачевская А.А.
- Влияние температуры впрыска пара в камеру сгорания газопаровой установки на ее энергетические характеристики**  
Галашов Н.Н., Туболев А.А., Минор А.А., Болдусhevский Е.С.
- Обзор мирового рынка вольфрама. Часть 2. Товарные потоки сырьевых вольфрамовых продуктов**  
Боярко Г.Ю.
- Применение фазоэнергетического анализа сейсмических волн для прогноза геологического разреза**  
Кочегуров А.И., Кочегурова Е.А., Орлов О.В.
- Построение многоуровневых статистических моделей прогноза значений смачиваемости по Восточно-Ламбейшорскому и Ярейскому месторождениям**  
Саегтгараев А.Д., Галкин В.И., Путилов И.С., Неволин А.И.
- Цеолизитсодержащий трепел Хотынецкого месторождения (Орловская область): минеральный состав, сорбционные свойства, условия образования**  
Белоусов П.Е., Карелина Н.Д., Морозов И.А., Рудмин М.А., Милютин В.В., Некрасова Н.А., Румянцева А.О., Закусина О.В., Крупская В.В.
- Новый подход к моделированию и прогнозированию эффективности осадко-гелеобразующих методов увеличения нефтеотдачи**  
Фёдоров К.М., Гильманов А.Я., Шевелёв А.П.
- Сопоставительный анализ аналитического и численного методов расчета напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны на основе упругой модели с учетом основных конструктивных элементов скважины**  
Попов С.Н., Чернышов С.Е., Кривошеков С.Н.
- Численная оценка плотности грунта методом конечно-разностных сеток при математическом моделировании уплотнения просадочных грунтов глубинными взрывами**  
Тарасенко Е.О.
- Calculation of heat transfer intensity of gas fuel combustion products**  
Mrakin A.N., Afanaseva O.V., Kuleshov O.Yu.
- Анализ факторов формирования максимального стока реки Чумыш (Западная Сибирь)**  
Самойлова С.Ю., Ловцкая О.В., Кудишин А.В., Арнаут Д.В.
- Минералогия россыпного месторождения золота р. Заслонка (Горная Шория)**  
Пшеничкин А.Я., Гаврилов Р.Ю.
- Особенности определения фильтрационных параметров сложнопостроенных карбонатных коллекторов при их эксплуатации горизонтальными скважинами**  
Сальникова О.Л., Черных И.А., Мартюшев Д.А., Пономарева И.Н.
- 7 Magnetic-pulse treatment to improve the strength properties of defective sections of oil and gas pipelines**  
Shipachev A.M., Aljadly M.
- 17 Toxic elements in groundwater in the northern regions of the Ob-Zaysan folded region**  
Maksimova A.A., Chernykh A.V., Novikov D.A., Dultsev F.F., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., Nikitenkov A.N., Khvachshevskaya A.A.
- 27 Influence of the temperature of steam injection into the combustion chamber of a gas-steam plant on its energy characteristics**  
Galashov N.N., Tubolev A.A., Minor A.A., Boldushevsky E.S.
- 37 Overview of the global tungsten market. Part 2. Commodity flows of raw tungsten products**  
Boyarko G.Yu.
- 54 Application of phase-energy analysis of seismic waves for geological section prediction**  
Kochegurov A.I., Kochegurova E.A., Orlov O.V.
- 63 Construction of multilevel statistical models for predicting wettability indicators of Eastern Lambeishor and Yareyu fields**  
Saetgaraev A.D., Galkin V.I., Putilov I.S., Nevolin A.I.
- 70 Zeolite-containing tripoli of Khotynets deposit (Orel region): mineral composition, sorption properties and formation conditions**  
Belousov P.E., Karelina N.D., Morozov I.A., Rudmin M.A., Milyutin V.V., Nekrasova N.A., Rumyantseva A.O., Zakusina O.V., Krupskaya V.V.
- 85 New approach to simulation and efficiency prediction of precipitation and gel enhanced oil recovery methods**  
Fedorov K.M., Gilmanov A.Ya., Shevelev A.P.
- 94 Comparative analysis of the analytical and numerical methods for calculating the stress-strain state of the near-wellbore zone based on the elastic model taking into account the main structural elements of the well**  
Popov S.N., Chernyshov S.E., Krivoshchekov S.N.
- 103 Numerical estimation of soil density by the method of finite difference grids in mathematical modeling of compaction of subsible soils by deep explosions**  
Tarasenko E.O.
- 109 Расчет интенсивности теплообмена продуктов сгорания газовых топлив**  
Мракин А.Н., Афанасьева О.В., Кулешов О.Ю.
- 116 Analysis of factors for formation of the Chumysh river maximum runoff (Western Siberia)**  
Samoilova S.Yu., Lovtskaya O.V., Kudishin A.V., Arnaut D.V.
- 129 Mineralogy of placer gold deposit of the river Zaslonka (Gornaya Shoria)**  
Pshenichkin A.Ya., Gavrilov R.Yu.
- 138 Features of determining filtration parameters of complex carbonate reservoirs at their operation by horizontal wells**  
Salnikova O.L., Chernykh I.A., Martyshev D.A., Ponomareva I.N.

<b>Результаты изучения плейстоцена в разрезе Вильгорт (Чердынский район Пермского Края)</b> Плюснин А.В., Сулима А.И., Маринов В.А., Вдовиченко С.Е., Самодуров С.А.	<b>148</b>	<b>Results of studying the Pleistocene in the Vilgort section (Cherdyn district, Perm territory)</b> Plyusnin A.V., Sulima A.I., Marinov V.A., Vdovichenko S.E., Samodurov S.A.
<b>Зажигание частиц древесной биомассы в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве</b> Сыродой С.В., Малышев Д.Ю., Косторева Ж.А., Косторева А.А., Омаров А.А.	<b>159</b>	<b>Ignition of wooden biomass particles under microwave exposure at high-temperature radiation-convective heating</b> Syrodoy S.V., Malyshev D.Yu., Kostoreva Zh.A., Kostoreva A.A., Omarov A.A.
<b>Переходные процессы в электротехническом комплексе добывающей скважины с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности</b> Глазырин А.С., Исаев Ю.Н., Копырин В.А., Тимошкин В.В., Кладиев С.Н., Хамитов Р.Н., Ковалев В.З., Лосев Ф.А., Леонов А.П., Попов Е.И.	<b>168</b>	<b>Transient processes in electrical complex of production well with downhole compensator of reactive power</b> Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kopyrin V.A., Timoshkin V.V., Kladiev S.N., Khamitov R.N., Kovalev V.Z., Losev F.A., Leonov A.P., Popov E.I.
<b>Устройство и технология непрерывной промывки скважины</b> Третьяк А.Я., Литкевич Ю.Ф., Круглова Т.Н.	<b>181</b>	<b>Device and technology of continuous well flushing</b> Tretyak A.Ya., Litkevich Yu.F., Kruglova T.N.
<b>Миграция естественных радионуклидов в системе «гидрокриогенные компоненты – вода – поровые воды донных осадков» в городских водоемах</b> Селезнев А.А., Торопов А.С., Окунева Т.Г., Киселева Д.В., Ярмошенко И.В., Рянская А.Д.	<b>189</b>	<b>Migration of natural radionuclides in the system «hydrocryogenic components – water – pore water of bottom sediments» in urban water bodies</b> Seleznev A.A., Toropov A.S., Okuneva T.G., Kiseleva D.V., Yarmoshenko I.V., Ryanskaya A.D.
<b>Разработка специализированного программного комплекса для нейросетевого прогноза паводковых вод</b> Сырымкин В.И., Иваненко Б.П., Клестов С.А., Хильчук М.Д.	<b>205</b>	<b>Development of a specialized software package for neural network forecast of flood waters</b> Syryamkin V.I., Ivanenko B.P., Klestov S.A., Khilchuk M.D.

УДК 622.692.4.053

## МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ДЕФЕКТНЫХ УЧАСТКОВ НЕФТЕ- И ГАЗОПРОВОДОВ

Щипачев Андрей Михайлович<sup>1</sup>,  
schipachev\_am@pers.spmi.ru

Алжадли Мохаммед<sup>1</sup>,  
mohammedaljadly@gmail.com

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет,  
Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2.

**Актуальность.** В процессе эксплуатации нефте- и газопроводов в структуре металла их стенок возникают дефекты сплошности (поры, расслоения, трещины различной природы и др.). Особенность данных дефектов обусловлена тем, что при эксплуатационных нагрузках в их вершинах возникает концентрация напряжений, что приводит к росту количества дефектов и геометрических размеров с последующим слиянием последних и образованием крупных дефектов и, как следствие, снижению прочностных свойств металла трубопроводов. Раннее выявление дефектов сплошности металла и их устранение до того, как они достигнут критического размера, являются актуальными задачами, решение которых повысит надежность и прочностные свойства металла трубопроводов, а также продлит их ресурс.

**Цель:** исследование эффективности магнитно-импульсной обработки для повышения прочностных характеристик металла стенки бывших в эксплуатации нефте- и газопроводов путем уменьшения размеров дефектов.

**Объекты:** дефектные участки магистральных нефте- и газопроводов.

**Методы:** магнитно-импульсная обработка образцов из стали 17Г1С бывшего в эксплуатации магистрального газопровода диаметром 720 мм, содержащих коррозионное растрескивание под напряжением, на магнитно-импульсной установке МИУ-10-СГАУ, определение изменений температуры, вызванных магнитно-импульсной обработкой, испытание образцов на ударную вязкость, определение влияния магнитно-импульсной обработки на прочностные свойства металла газопровода, исследование поверхности излома образцов после испытаний на ударную вязкость.

**Результаты.** Экспериментально было установлено повышение на 14 % ударной вязкости обработанных магнитно-импульсной обработкой образцов по сравнению с необработанными образцами. Снимки распределения температуры при магнитно-импульсной обработке показали значительное повышение температуры вблизи вершин трещин. Было выявлено, что разрушение металла образцов, подвергнутых магнитно-импульсному воздействию, приобрело более вязкий характер.

### Ключевые слова:

дефекты сплошности, магистральный газопровод, магнитно-импульсное поле, индуктор, термические сжимающие напряжения, ударная вязкость.

### Введение

В технологических процессах изготовления и в процессе эксплуатации магистральных нефте- и газопроводов в их металле возникают дефекты сплошности (поры, расслоения, трещины различной природы и др.). Зарождение, рост и накопление этих дефектов в структуре металла приводят к снижению способности металла сопротивляться деформации вследствие снижения пластичности [1–3]. При воздействии эксплуатационных нагрузок на стенку трубопровода в вершинах имеющихся в ней дефектов возникают зоны концентрации напряжений, что приводит к увеличению количества дефектов и их геометрических размеров с последующим слиянием дефектов и образованием крупных несплошностей, и, как следствие, снижаются эксплуатационные, прочностные свойства и срок службы трубопроводов, находящихся в эксплуатации [4–6].

Известно, что нефте- и газопроводы постоянно находятся в сложном напряженном состоянии, подвергаясь воздействию множественных переменных и статических нагрузок (колебания давления, гидроудары, вибрационные процессы, температурные воздействия и др.), что обеспечивает благоприятные

условия для накопления повреждений и их быстрого роста вплоть до разрушения [7–9]. Проведенный анализ причин аварийных ситуаций на объектах трубопроводного транспорта свидетельствует о том, что возникновение, накопление и распространение дефектов сплошности в металле трубопроводов являются основными причинами преждевременного выхода их из строя [10–14].

Таким образом, раннее выявление дефектов сплошности металла и их устранение на ранней стадии их развития до того, как они достигнут критического размера, являются актуальными задачами, решение которых значительно повысит надёжность трубопроводов и продлит их ресурс.

С целью сокращения времени и стоимости ремонтных работ был разработан ряд методов, которые позволяют восстановить дефектные зоны металла: электронно-лучевая обработка, термическая обработка, обработка лазерными ударными импульсами, обработка высокоэнергетическим импульсным током [15–18]. Однако эти методы являются эффективными только для устранения поверхностных и подповерхностных дефектов из-за малой глубины проникновения. Кроме того, их можно применять только в лабораторных и стендовых условиях [19–21].

Одним из современных методов устранения дефектов сплошности в металлических конструкциях, находящихся под нагрузкой, является магнитно-импульсная обработка (МИО). Было установлено, что при воздействии на металл высокоэнергетическим электромагнитным импульсом вблизи несплошностей происходит концентрация электромагнитного поля [22, 23]. В результате этого, наряду с механическим воздействием, происходит частичное расплавление металла в зоне максимальной концентрации – в вершине трещиноподобного дефекта [24].

В работах ряда ведущих специалистов в области магнитно-импульсной обработки металлов [25, 26] были предложены математические модели для изучения физических механизмов восстановления сплошности структуры металла высокоэнергетическим электромагнитным импульсом. Из предложенных моделей следует, что при воздействии на металл высокоэнергетическим электромагнитным импульсом вблизи трещин происходит быстрый неоднородный локальный нагрев, сопровождаемый тепловым расширением, и, как следствие, возникают большие сжимающие напряжения, приводящие к смыканию берегов трещин и замедлению их дальнейшего развития. Экспериментальное подтверждение устранения дефектов структуры металла высокоэнергетическим электромагнитным воздействием было получено в работе [27]. Исследование показало, что микродефекты титановых пластин «залечиваются» после электромагнитного воздействия. Смыкание дефектов происходит при определенных характеристиках (величине, продолжительности и т. п.) импульсного воздействия.

В статьях, посвященных восстановлению работоспособности металлов [28, 29], проведены экспериментальные исследования изменения объема микродефектов и восстановления сплошности образцов, изготовленных из различных сталей, после воздействия на них высокоэнергетическим электромагнитным импульсом. В результате было установлено, что вследствие электромагнитного воздействия происходит восстановление сплошности структуры металла.

На основе анализа работ отечественных и зарубежных авторов по вопросу устранения дефектов сплошности магнитно-импульсной обработкой следует отметить, что экспериментальные исследования проводились только на тонких металлических пластинах (1–5 мм), изготовленных из сплавов с низколегированной трубной стали, титанового сплава ВТ1-00 и алюминиевого сплава АД000 [30–32].

Использование образцов, вырезанных из бывших в эксплуатации магистральных газопроводов, позволит учитывать состав металла трубопроводов и толщину их стенок как фактор, влияющий на эффективность магнитно-импульсной обработки.

В данной работе был проведен анализ результатов магнитно-импульсной обработки образцов, вырезанных из бывших в эксплуатации газопроводов, содержащих поверхностные трещины. Обработка образцов производилась на магнитно-импульсной установке МИУ-10-СГАУ с помощью многовиткового цилиндрического индуктора.

#### Принцип работы магнитно-импульсной установки

Принцип работы магнитно-импульсной установки (МИУ) основан на прямом преобразовании электрической энергии, запасаемой накопителем энергии, в электромагнитное поле, действующее в рабочей зоне индуктора при разряде импульсных конденсаторов накопителей энергии. Электромагнитное поле индуктора наводит в обрабатываемой детали вихревые токи. Вихревые токи, в свою очередь, создают электромагнитное поле, взаимодействие которого с электромагнитным полем индуктора приводит к деформации обрабатываемой детали. С другой стороны, вихревые токи приводят к импульсному нагреву детали в окрестностях дефектов сплошности [33, 34]. Импульс магнитного поля (ИМП) воздействует на обрабатываемую заготовку как в виде затухающего синусоидального импульсного давления, так и в виде термических напряжений, действующих в скин-слое [35, 36]. Давление на поверхность металла распространяется в виде волны сжатия, вызывая пластическую деформацию несплошностей и уменьшение их размеров [37, 38]. Термические напряжения возникают в результате концентрации индукционных токов вблизи вершин микротрещин, что приводит к локальному неоднородному нагреву этих зон. Нагрев в окрестности трещин сопровождается тепловым расширением, и, как следствие, в контуре дефекта возникают термические сжимающие напряжения, приводящие к смыканию трещин.

Температура вблизи вершин трещин может, в зависимости от параметров МИО и свойств обрабатываемой детали, увеличиться вплоть до расплавления металла. При этом образуется кратер, диаметр которого может достигать нескольких миллиметров.

Расплавленный металл выбрасывается внутрь трещин под действием сжимающих напряжений. В результате происходит заваривание трещин расплавленным материалом и торможение их дальнейшего развития [39, 40].

#### Материалы и методы исследования

##### Приготовление образцов

В качестве материала для исследования были изготовлены два фрагмента из стали 17Г1С из бывших в эксплуатации магистральных трубопроводов диаметром 720 мм, содержащих поверхностные трещины. Размеры фрагментов составили 301×50 мм, а средняя толщина – 16,6 мм.

Специфическое распределение трещин на поверхности фрагментов было исследовано магнитопорошковым и магнитно-вихретоковым контролем.

В качестве средств для магнитопорошкового контроля была использована черная магнитопорошковая суспензия Magnavis 7HF. Магнитно-вихретоковый контроль проводился с помощью вихретокового дефектоскопа ВК-1.

По результатам магнитопорошкового контроля на наружной поверхности фрагментов была обнаружена сетка продольных трещин, по внешним признакам соответствующая коррозионному растрескиванию под

напряжением (КРН). Глубина трещин была определена магнитно-вихретоковым контролем и составляла от 0,3 до 1,5 мм, ширина раскрытия – менее 0,1 мм.

На рис. 1 приведено изображение наружной поверхности фрагмента № 1 после проведения магнито-

порошкового контроля, где отображена зона скопления коррозионного растрескивания под напряжением. Изображение получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body (максимальное разрешение 5472×3648 пикселей).

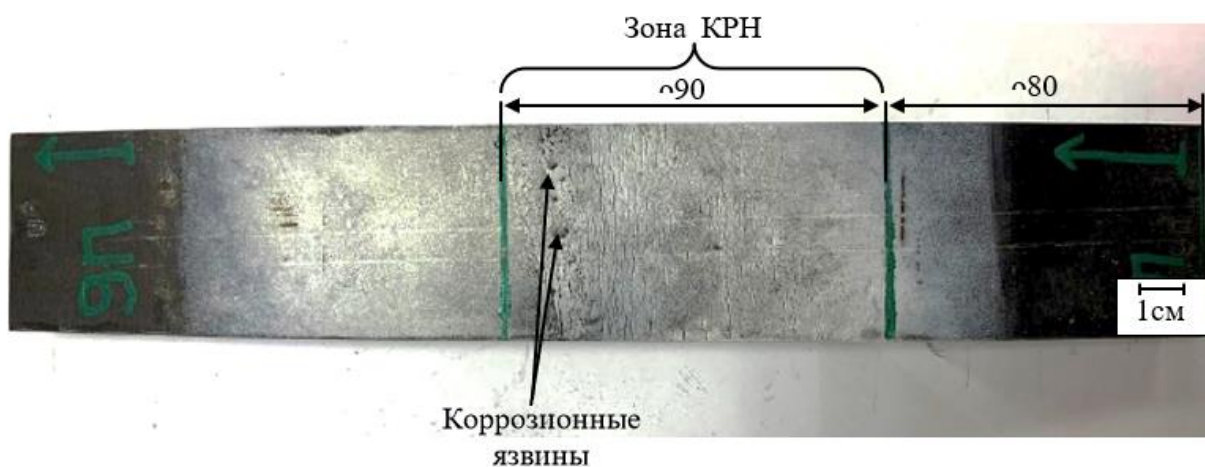


**Рис. 1.** Изображение наружной поверхности фрагмента № 1 (получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body) после проведения магнитопорошкового контроля

**Fig. 1.** Image of the outer surface of fragment no. 1 obtained by a Canon eos r6 body camera after magnetic particle inspection

На рис. 2 представлено изображение наружной поверхности фрагмента № 2 после проведения магнитопорошкового контроля, где отображена зона скопления дефектов коррозионного растрескивания под

напряжением. Изображение получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body (максимальное разрешение 5472×3648 пикселей).



**Рис. 2.** Изображение наружной поверхности фрагмента № 2 (получено с помощью фотоаппарата Canon eos r6 body) после проведения магнитопорошкового контроля

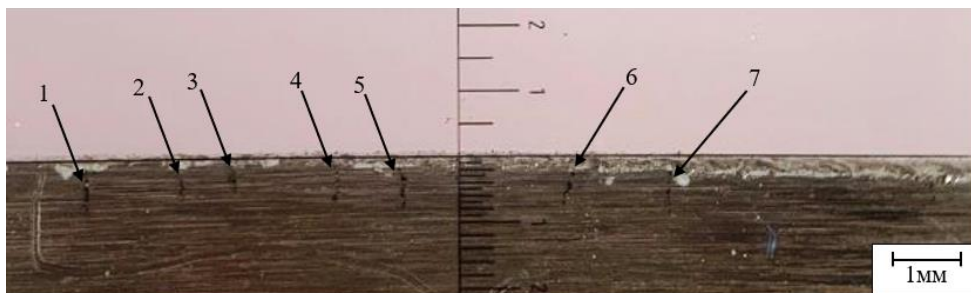
**Fig. 2.** Image of the outer surface of fragment no. 2 obtained by a Canon eos r6 body camera, after magnetic particle inspection

Из зоны КРН образца № 1 были вырезаны ленточной пилой шесть образцов вдоль трещин размерами 50×10 мм.

На рис. 3 представлено изображение боковой поверхности одного из образцов, вырезанных из зоны КРН фрагмента № 1, где отмечаются отдельные трещины, которым присвоили номера 1–7. Глубина трещин измерялась лупой при десятикратном увеличении и составила не более 0,8 мм, а ширина раскрытия – менее 0,1 мм. Трещины распространяются с наружной поверхности образца в глубину металла.

Из зоны КРН фрагмента № 2 были вырезаны ленточной пилой шесть образцов вдоль трещин размерами 50×10 мм.

На рис. 4 представлено изображение боковой поверхности одного из образцов, вырезанных из зоны КРН фрагмента № 2, где выявлены отдельные трещины, распространяющиеся с наружной поверхности в глубину металла. Глубина трещин измерялась лупой при десятикратном увеличении и составила не более 1,1 мм, а ширина раскрытия – менее 0,1 мм.



**Рис. 3.** Изображение боковой поверхности образца, вырезанного из зоны коррозионного растрескивания под напряжением фрагмента № 1, полученное с помощью лупы при десятикратном увеличении

**Fig. 3.** Image of lateral surfaces of the sample prepared from the stress corrosion cracking zone of fragment no. 1, obtained by a loupe with 10× magnification



**Рис. 4.** Изображение боковой поверхности образца, вырезанного из зоны коррозионного растрескивания под напряжением фрагмента № 2, полученное с помощью лупы при десятикратном увеличении

**Fig. 4.** Image of lateral surface of the sample prepared from the zone of stress corrosion cracking of fragments no. 2, obtained by a loupe with 10× magnification

#### Характеристики методов исследования

Шесть образцов, вырезанных из зоны КРН фрагмента № 1, составили группу образцов № 1, образцы из фрагмента № 2 – группу № 2.

Все образцы группы № 1 были подвергнуты магнитно-импульсному воздействию со следующими параметрами: запасенная энергия 5 кДж; разрядный ток 175 кА.

Магнитно-импульсная обработка образцов группы № 1 производилась на магнитно-импульсной установке МИУ-10-СГАУ с помощью многовиткового цилиндрического индуктора.

Магнитно-импульсная установка МИУ-10-СГАУ обладает следующими техническими характеристиками: максимальная запасаемая энергия в конденсаторах накопителей 10 кДж; напряжение заряда накопителей от 1 до 20 кВ; частота разрядного тока 55 кГц; масса 350 кг; габаритные размеры 0,8×0,9×1,1 м.

Магнитно-импульсная обработка осуществлялась следующим образом: образцы группы № 1 поочередно размещались внутри цилиндрического индуктора и фиксировались с помощью фиксатора во избежание их выброса образующимся давлением. Затем с помощью блока дозирования энергии устанавливалось нужное значение энергии (в нашем случае 5 кДж) и установка заряжалась до заданного ранее значения командой заряда. При достижении заданного уровня энергии запасенная энергия мгновенно разряжалась в

контуре индуктора с помощью команды разряда, которая запускала работу вакуумных разрядников. Индуктор преобразовывал электрическую энергию, протекавшую в нем, в электромагнитное поле, действующее на обрабатываемые образцы.

С целью исследования температурного эффекта магнитно-импульсного воздействия были сделаны снимки распределения тепловых полей в процессе МИО. Снимки были сделаны с помощью тепловизора FLIR-P640 со следующими характеристиками: диапазон температур от –40 до +500 °С; быстродействие 1 мкс; погрешность 0,5 %.

После проведения МИО образцов группы № 1, образцы группы № 1 (подвергнутые магнитно-импульсному воздействию) и образцы группы № 2 (не подвергнутые магнитно-импульсному воздействию) были испытаны на ударную вязкость.

Данный метод был выбран, поскольку он является самым чувствительным к изменению структуры металла и его склонности к разрушению.

Исследования ударной вязкости проводились на маятниковом копре ИО 5003-03 одиночным ударом при комнатной температуре 25 °С, скорость движения маятника в момент удара составляла 5,32 м/с.

После испытаний образцов на ударную вязкость было исследовано поперечное сечение образцов, по которому произошло разрушение, с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ-NANO SEM3000) при 250-кратном увеличении.



Для исследования были выбраны два образца, один из группы № 1 (обработанный МИО), а другой из группы № 2 (необработанный МИО), образцы одновременно помещались в камеру микроскопа.

Микроскоп типа РЭМ-NANO SEM3000 имеет следующие технические характеристики: разрешение 1 нм; ускоряющее напряжение от 0 до 30 кВ; диапазон увеличения от 10× до 1 000 000×; максимальный размер образца 260×240 мм.

#### Результаты и обсуждения

Расчет ударной вязкости по итогам всех видов замеров был выполнен по формуле [41]:

$$a_k = \frac{A_k}{F},$$

где  $A_k$  – работа, затраченная на разрушение образца, Дж;  $F$  – площадь поперечного сечения образца, по которому произошло разрушение  $\text{см}^2$ .

По полученным результатам испытаний на ударную вязкость составлены табл. 1, 2.

Результаты испытаний показывают, что ударная вязкость обработанных образцов магнитно-импульсным воздействием повысилась на 14 % по сравнению с необработанными образцами, что позволит сделать вывод о том, что образцы после магнитно-импульсной обработки стали более устойчивыми к разрушению.

С помощью тепловизора TVP FLIR-P640 были получены распределения тепловых полей, которые показали, что точкой интенсивного теплового воздействия являются вершины трещин, где зарегистрировано повышение температуры до 210 °С на момент окончания воздействия 710 мкс. Это соответствует результатам математического моделирования, проведенного в работах [25, 26].

**Таблица 1.** Результаты испытаний на ударную вязкость для образцов, вырезанных из фрагмента № 2 (без магнитно-импульсной обработки)

**Table 1.** Results of calculating the impact strength for samples prepared from fragment no. 2 (without magnetic pulse treatment)

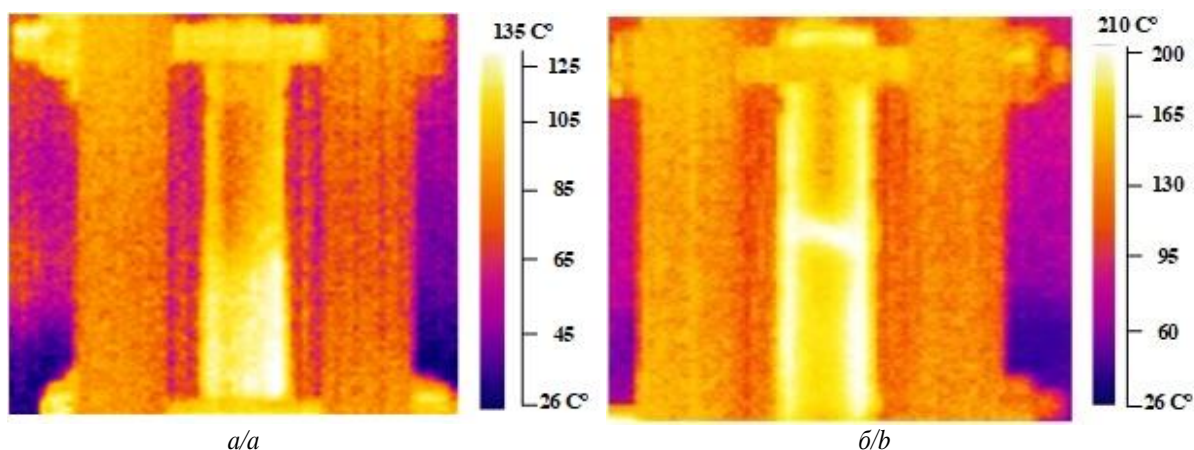
№ образца Sample no.	$A_k$ , Дж/л	$F$ , $\text{см}^2$ $\text{см}^2$	$a_k$ , Дж/см <sup>2</sup> J/cm <sup>2</sup>	Среднее значение, Дж/см <sup>2</sup> Average value, J/cm <sup>2</sup>
1	48,2	0,82	58,8	61
2	49	0,822	59,6	
3	50,0	0,823	60,82	
4	51	0,824	62	
5	51,3	0,825	62,2	
6	51,7	0,827	62,5	

**Таблица 2.** Результаты испытаний на ударную вязкость для образцов, вырезанных из фрагмента № 1 (после магнитно-импульсной обработки)

**Table 2.** Results of calculating the impact strength for samples prepared from fragment no. 1 (after magnetic pulse treatment)

№ образца Sample no.	$A_k$ , Дж/л	$F$ , $\text{см}^2$ $\text{см}^2$	$a_k$ , Дж/см <sup>2</sup> J/cm <sup>2</sup>	Среднее значение, Дж/см <sup>2</sup> Average value, J/cm <sup>2</sup>
1	55,5	0,819	67,7	68,4
2	56,2	0,82	68,5	
3	56,5	0,823	68,65	
4	55,8	0,822	68	
5	56,7	0,825	68,7	
6	57,2	0,828	69	

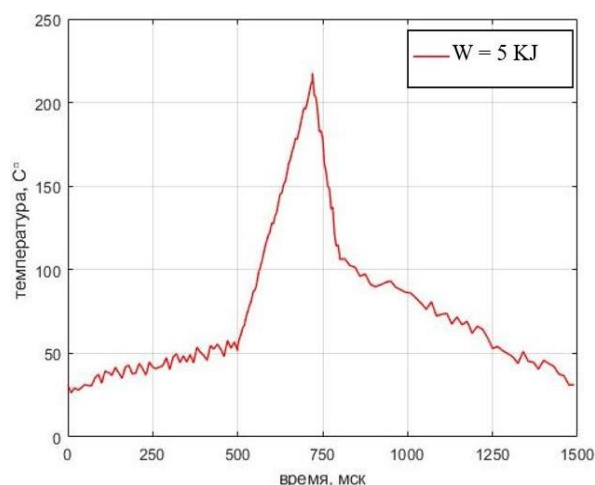
На рис. 5 представлены снимки распределения температуры при МИО в разные моменты времени  $t$ .



**Рис. 5.** Снимок распределения температуры при магнитно-импульсной обработке в разные моменты времени: а)  $t=615$  мкс; б) момент окончания магнитно-импульсного воздействия ( $t=710$  мкс)

**Fig. 5.** Snapshot of the temperature distribution during magnetic pulse processing at different points in time: а)  $t=615$  μs; б) moment of the end of the magnetic-pulsed action ( $t=710$  μs)

На рис. 6 показан график распределения тепловых полей во время МИО, полученный с помощью тепловизора TVP FLIR-P640.

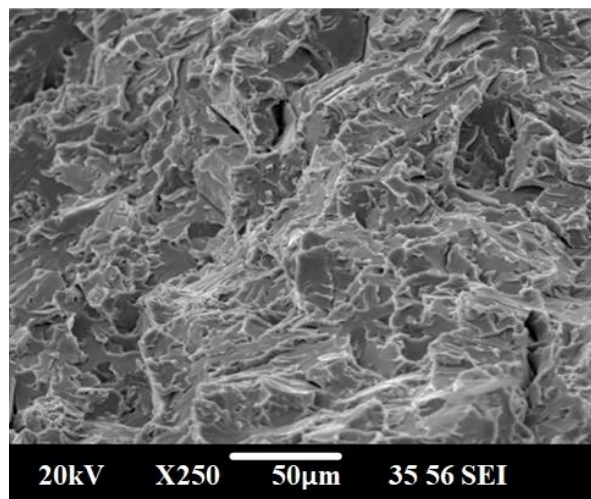


**Рис. 6.** Зависимость температуры от времени магнитно-импульсного воздействия при параметрах: запасенная энергия 5 кДж; разрядный ток 175 кА

**Fig. 6.** Dependence of temperature on the time of magnetic-pulse exposure with parameters: energy 5 kJ, discharge current 175 kA

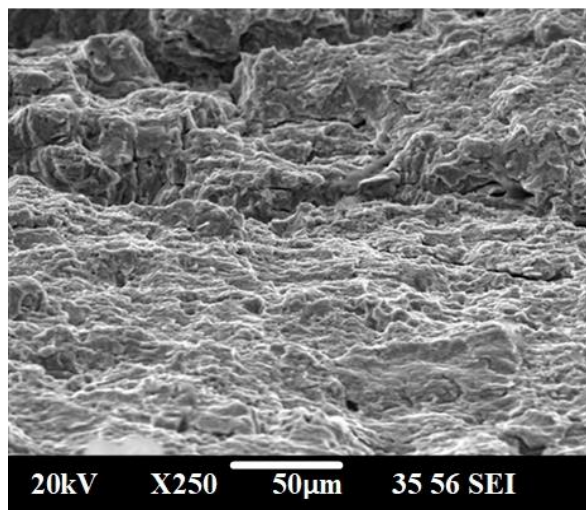
Из рис. 6 следует, что температура вблизи вершин трещин не достигла значения плавления металла, что объясняется тем, что плотность индуцированных токов не достигла необходимого значения для плавления металла.

Полученные с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ-NANO SEM3000) снимки поверхности излома образцов изображены на рис. 7, 8.



**Рис. 7.** Изображение поверхности излома образца без магнитно-импульсной обработки

**Fig. 7.** Image of the fracture surface of the sample without magnetic-pulse treatment



**Рис. 8.** Изображение поверхности излома образца с магнитно-импульсной обработкой

**Fig. 8.** Images of the fracture surface of the sample with magnetic-pulse treatment

На рис. 7 наблюдаются заостренные кромки границ излома, что соответствует признакам хрупкого разрушения. Снимок излома обработанного образца (рис. 8) показывает более сглаженные поверхности излома по сравнению с изломом необработанного образца, о чем свидетельствуют признаки вязкого разрушения (элементы чашечного рельефа).

Таким образом, полученные снимки излома образцов до и после магнитно-импульсной обработки дают возможность говорить о том, что воздействие на металл образцов высокоэнергетическим электромагнитным импульсом привело к структурным изменениям, так как разрушение металла после обработки стало более вязким.

#### Выводы

1. Экспериментально установлено, что МИО приводит к повышению прочностных свойств металла трубопровода, содержащего систему трещиноподобных дефектов. В частности, ударная вязкость возросла на 14 %.
2. Полученные снимки температурных изменений при магнитно-импульсной обработке показывают, что применяемая энергия МИУ не была достаточна для того, чтобы достичь температуры расплавления металла. Таким образом, повышение ударной вязкости произошло не за счет устранения дефектов, а за счет структурных изменений металла, так как было установлено, что характер разрушения после обработки стал более вязким.
3. Полученные результаты исследований позволяют говорить о том, что применение данной технологии является перспективным для повышения надежности, срока службы деталей и улучшения их прочностных свойств.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maksarov V.V., Efimov A.E., Keksini A.I. Influence of the microstructure on the damping properties of stress-strain tool

systems in the processing of welded structures from dissimilar steels // Materials science forum. – 2021. – V. 1022. – P. 7–16. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.7



2. Nanotechnologies of strength control of materials / V.V. Nosov, E. Grigoriev, S. Peretyatko, A.P. Artyushchenko // *Materials Science Forum*. – 2021. – V. 1040. – P. 101–108. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.101
3. Koteleva N., Loseva E. Development of an algorithm for determining defects in cast-in-place piles based on the data analysis of low strain integrity testing // *Applied Sciences*. – 2022. – V. 12. – № 20. – P. 10636. URL: <https://doi.org/10.3390/app122010636> (дата обращения: 15.12.2022).
4. Calculation of durability and fatigue life parameters of structural alloys using a multilevel model of acoustic emission pulse flow / O.G. Perveitalov, V.V. Nosov, A.I. Borovkov, K.M. Khanukhov, N.V. Chetvertukhin // *Metals*. – 2023. – V. 13 (1). – № 4. DOI: 10.3390/met13010004
5. Shammazov I., Dzhemilev E., Sidorkin D. Improving the method of replacing the defective sections of main oil and gas pipelines using laser scanning data // *Applied Sciences*. – 2023. – V. 13. – № 1. – P. 48. DOI: 10.3390/app13010048
6. Korobkov G.E., Yanchushka A.P., Zakiryanov M.V. Numerical modeling of a stress-strain state of a gas pipeline with cold bending offsets according to in-line inspection // *Journal of Mining Institute*. – 2018. – V. 234. – P. 643–646. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.643
7. Оценка влияния внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода / Р.Н. Бахтизин, Р.М. Зарипов, Г.Е. Коробков, Р.Б. Масалимов // *Записки Горного института* – 2020. – Т. 242 – С. 160–168. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.160
8. Fetisov V., Tsvetkov P., Müller J. Tariff approach to regulation of the European gas transportation system: case of Nord Stream // *Energy Reports*. – 2021. – V. 7. – № 6. – P. 413–425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.023> (дата обращения: 15.12.2022).
9. Разработка технологии и устройства для ремонта магистральных трубопроводов с вырезанием их дефектных участков / Э.Р. Джемилев, И.А. Шаммазов, Д.И. Сидоркин, Б.Н. Мастобаев, А.К. Гумеров. // *Нефтяное хозяйство*. – 2022. – № 10. – С. 78–82. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-10-78-82
10. Kovshov S.V., Alimhanova T.A., Kitsis V.M. Methodology for assessing the risks of emergencies on the east siberia – pacific ocean oil and gas main pipeline // *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*. – 2020. – V. 10. – № 1. – P. 13–20. DOI: 10.24247/ijmperdfeb20202
11. Шаммазов И.А., Сидоркин Д.И., Батыров А.М. Обеспечение устойчивости надземных магистральных трубопроводов в районах сплошного распространения многолетнемерзлых пород // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333 – № 12. – С. 200–207. DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3832
12. Использование компактных инспекционных приборов для контроля технического состояния трубопроводов в защитных футлярах / М.З. Ямилев, В.В. Пшенин, Д.С. Матвеев, Д.С. Подлесный, Т.И. Безмяньников // *Нефтяное хозяйство*. – 2022. – Т. 2. – С. 106–110. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-2-106-110
13. Estimation of the influence of compressed hydrogen on the mechanical properties of pipeline steels / V.I. Bolobov, I.U. Latipov, G.G. Popov, G.V. Buslaev, Ya.V. Martynenko // *Energies*. – 2021. – V. 14. – № 19. – P. 1–27. URL: <https://doi.org/10.3390/en14196085> (дата обращения: 15.12.2022).
14. New concepts of hydrogen production and storage in Arctic region / M. Dvoynikov, G. Buslaev, A. Kunshin, D. Sidorov, A. Kraslawski, M. Budovskaya // *Resources*. – 2021. – V. 10. DOI: 10.3390/resources10010003
15. Murray J.W., Clare A.T. Repair of EDM induced surface cracks by pulsed electron beam irradiation // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2012. – V. 212. – № 12. – P. 2642–2651. DOI: 10.1016/j.jmatprot.2012.07.018
16. Microstructural assessment of AISI 1021 steel under rapid cyclic heat treatment process / A.A. Adeleke, P.P. Ikubanni, T.A. Orhadahwe, J.O. Aweda, J.K. Odusote, O.O. Agboola // *Results in Engineering*. – 2019. – V. 4. – P. 100044. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100044> (дата обращения: 15.12.2022).
17. Бровер А.В. Комплекс механизмов упрочнения металлических материалов при импульсной лазерной обработке // *Перспективные материалы*. – 2008. – № 1. – С. 63–69.
18. Numerical calculation and experimental research on crack arrest by detour effect and joule heating of high pulsed current in remanufacturing / J. Yu, H. Zhang, D. Deng, S. Hao, A. Iqbal // *Chinese journal of mechanical engineering*. – 2014. – V. 27. – № 4. – P. 745–753. DOI: 10.3901/CJME.2014.0414.075
19. Liu T.J.C. Thermo-electro-structural coupled analyses of crack arrest by Joule 4353 heating // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. – 2008. – V. 49. – № 2. – P. 171–184. DOI: 10.1016/j.tafmec.2007.12.001
20. Yuan C.L., Zhong Y.X. Self-healing mechanism of inner crack in plastic deformation under high temperature // *Journal of Plasticity Engineering*. – 2006. – V. 13. – P. 53–57.
21. Strain rate correspondence of fracture surface features and tensile properties in AISI304 stainless steel under different LSP impact time / J.Z. Lu, J.S. Zhong, K.Y. Luo, L. Zhang, H. Qi, M. Luo, X.J. Xu, J.Z. Zhou // *Surface and Coatings Technology*. – 2013. – V. 221. – P. 88–93. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.01.031
22. Финкель В.М., Головин Ю.И., Слетков А.А. О возможности торможения быстрых трещин импульсами тока // *Доклады Академии наук СССР*. – 1976. – Т. 227. – № 4. – С. 848–851.
23. Finkel V.M., Ivanov V.M., Golovin Yu.I. Crack healing in metals by crossed electric and magnetic fields // *Strength of Materials*. – 1983. – V. 15. – № 4. – P. 501–506. DOI: 10.1007/BF01522429
24. Овчинников И.В. Определение ресурса пластичности при воздействии тока // *Проблемы прочности*. – 1993. – № 6. – С. 54–59.
25. Кукуджанов К.В., Левитин А.Л. Процессы трансформации и взаимодействия микротрещин в металле под воздействием высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2016 – № 2. – С. 89–110. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.07
26. Кукуджанов В.Н., Коломиец-Романенко А.В. Исследование влияния динамического воздействия электрического тока на механические свойства материалов с упорядоченной структурой дефектов // *Известия российской академии наук механика твердого тела*. – 2010. – № 3. – С. 188–199. DOI: 10.3103/S0025654410030167
27. Song H., Wang Z., Gao Ti. Effect of high density electropulsing treatment on formability of TC4 titanium alloy sheet // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2007. – V. 17. – P. 87–92. DOI: 10.1016/S1003-6326(07)60053-3
28. Ultrasonic monitoring of the accumulation of aging damage and recovery of the useful lifetime of industrial parts / L.B. Zuev, V.Ya. Tsellermaer, V.E. Gromov, V.V. Muravev // *Technical Physics* – 1997. – V. 49. – № 2. – P. 1094–1096. DOI: 10.1134/1.1258774
29. Acoustic evaluation of the endurance of steel specimens and recovery of their serviceability / L.B. Zuev, O.V. Sosnin, D.Z. Chirakadze, V.E. Gromov, V.V. Muravev // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 1998. – V. 39. – № 4. – P. 639–641. DOI: 10.1007/BF02471262
30. Rastvorova I.I., Demidovich V.B. Utilization of induction heating in the processing of titanium // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2017. – V. 12. – № 6. – P. 1062–1068.
31. Study of the temperature uniformity of aluminum billets heated by superconducting DC induction heaters / Y. Wang, H. Gao, Z. Li, Y. Ping, Z. Jin, Z. Hong // *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. – 2015. – V. 34. – № 1. – P. 357–670. DOI: 10.1108/COMPEL-03-2014-0076
32. A microstructural study on the alkali-treated titanium subjected to induction heating / X. Chen, R. Zhu, H. Gao, W. Xu, G. Xiao, W. Xu // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2022. – V. 20. – P. 281–290. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.07.088
33. Kukudzhinov K.V., Levitin A.L. Modeling the healing of microcracks in metal stimulated by a pulsed high-energy electromagnetic field. P. I // *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*. – 2015. – V. 6. – № 3. – P. 233–250. DOI: 10.1615/NanomechanicsSciTechnolIntJ.v6.i3.60
34. Талалаев А.К. Индукторы и установки для магнитно-импульсной обработки металлов. – М.: НТИ Информтехника, 1992. – 143 с.
35. Кукуджанов К.В. Моделирование воздействия высокоэнергетического импульсного электромагнитного поля на микротрещины в поликристаллическом металле // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2015. – № 4. – С. 138–158. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.09

36. Моделирование воздействия ИМП на несплошности в структуре материалов деталей / Н.В. Курлаев, А.И. Гулидов, В.Б. Юдаев, Н.А. Рынгач // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2003. – Т. 2. – С. 80–86.
37. Влияние импульсной обработки на дефекты сплошности и долговечность материалов / Н.В. Курлаев, А.И. Гулидов, Л.Д. Мержиевский, Н.А. Рынгач // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2005. – № 18. – С. 97–110.
38. Смыкание несплошностей в структуре материалов деталей при магнитно-импульсной обработке / Н.В. Курлаев, А.И. Гулидов, Н.А. Рынгач, В.В. Красовский // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2002. – Т. 1. – № 12. – С. 131–140.
39. Баак Э., Шпенст В.А. Последние научные исследования в сфере электротермической металлургической обработки // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240. – С. 660–668. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.660.
40. Цуркин В.Н., Череповский С.С. Экспериментальное исследование воздействия ключевых параметров магнитно-импульсной обработки на величину электромагнитного давления // Литье и металлургия. – 2017. – Т. 1. – № 68. – С. 115–122.
41. Белевитин В.А. Измерение ударной вязкости металлов и сплавов: методические рекомендации. – Челябинск, Изд-во Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета, 2022. – 36 с.

*Поступила: 09.01.2023 г.*

*Прошла рецензирование: 16.03.2023 г.*

#### **Информация об авторах**

**Щипачев А.М.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой транспорта и хранения нефти и газа Санкт-Петербургского горного университета.

**Алжадли М.**, аспирант кафедры транспорта и хранения нефти и газа Санкт-Петербургского горного университета.

UDC 622.692.4.053

## MAGNETIC-PULSED TREATMENT TO IMPROVE THE STRENGTH PROPERTIES OF DEFECTIVE SECTIONS OF OIL AND GAS PIPELINES

Andrey M. Schipachev<sup>1</sup>,  
schipachev\_am@pers.spmi.ru

Mohammed Aljadly<sup>1</sup>,  
mohammedaljadly@gmail.com

<sup>1</sup> St. Petersburg Mining University,  
21, line 2, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia.

**The relevance.** During the operation of oil and gas pipelines, continuity defects (including point and linear defects such as delamination, cracks of various nature, etc.) occur in their structure. The peculiarity of material continuity defects is caused by the fact that in the process of loading the defects cause stress concentration near their tops, which leads to a rapid increase in their number and geometric dimensions, followed by the merging of the latter and the formation of large discontinuities, and as a consequence, the strength properties of pipelines decrease. Consequently, early detection of metal continuity defects and their elimination before they reach a critical size are urgent tasks. The solution of which will significantly improve the operational and strength properties of the working elements of pipelines and extend their lifespan.

**The main aim** of the research is to study the effectiveness of magnetic-pulse treatment to improve the strength properties of used oil and gas pipelines by reducing the defects size.

**Objects:** defective sections of main oil and gas pipelines.

**Methods:** magnetic pulse treatment of samples on a magnetic-pulse unit MPU-10-SSAU 10, determination of temperature changes caused by magnetic-pulse treatment, testing samples for impact strength on a pendulum-testing machine, comparison of the obtained results for treated and untreated samples, determination of the effect of magnetic-pulse treatment on the strength properties of gas pipeline metal, study of the fracture surface of samples after impact tests.

**Results.** It was established experimentally that the impact strength of the treated samples increased by 14 % compared to the untreated samples. Snapshots of the temperature distribution during the magnetic-pulse treatment showed a significant increase in temperature near the crack tips. It was found that destruction of the metal subjected to magnetic-pulse action acquired more viscous character.

### Key words:

continuity defects, main gas pipeline, magnetic-pulse field, inductor, thermal compressive stresses, impact strength.

### REFERENCES

1. Maksarov V.V., Efimov A.E., Keksins A.I. Influence of the microstructure on the damping properties of stress-strain tool systems in the processing of welded structures from dissimilar steels. *Materials science forum*, 2021, vol. 1022, pp. 7–16. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1022.7
2. Nosov V.V., Grigoriev E., Peretyatko S., Artyushchenko A.P. Nanotechnologies of strength control of materials. *Materials Science Forum*, 2021, vol. 1040, pp. 101–108. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.101
3. Koteleva N., Loseva E. Development of an algorithm for determining defects in cast-in-place piles based on the data analysis of low strain integrity testing. *Applied Sciences*, 2022, vol. 12, no. 20, pp. 10636. Available at: <https://doi.org/10.3390/app122010636> (accessed 15 December 2022).
4. Perveitalov O.G., Nosov V.V., Borovkov A.I., Khanukhov K.M., Chetvertukhin N.V. Calculation of durability and fatigue life parameters of structural alloys using a multilevel model of acoustic emission pulse flow. *Metals*, 2023, vol. 13 (1), no. 4. DOI: 10.3390/met13010004
5. Shammazov I., Dzhemilev E., Sidorkin D. Improving the method of replacing the defective sections of main oil and gas pipelines using laser scanning data. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 48. DOI: 10.3390/app13010048
6. Korobkov G.E., Yanchushka A.P., Zakiryanov M.V. Numerical modeling of a stress-strain state of a gas pipeline with cold bending offsets according to in-line inspection. *Journal of Mining Institute*, 2018, vol. 234, pp. 643–646. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.643
7. Baktizin R.N., Zaripov R.M., Korobkov G.E., Masalimov R.B. Assessment of internal pressure effect, causing additional bending of the pipeline. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 242, pp. 160–168. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.2.160> (accessed 15 December 2022).
8. Fetisov V., Tsvetkov P., Müller J. Tariff approach to regulation of the European gas transportation system: case of Nord Stream. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, no. 6, pp. 413–425. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.023> (accessed 15 December 2022).
9. Dzhemilev, Shammazov I., Sidorkin D., Mastobaev B., Gumerov A. Developing technology and device for the main pipelines repair with cutting out their defective sections. *Oil Industry*, 2022, vol. 10, pp. 78–82. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-10-78-82.
10. Kovshov S.V., Alimhanova T.A., Kitsis V.M. Methodology for assessing the risks of emergencies on the east siberia - pacific ocean oil and gas main pipeline. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 13–20. DOI: 10.24247/ijmperdfef20202
11. Shammazov I.A., Sidorkin D.I., Batyrov A.M. Ensuring the stability of aboveground trunk pipelines in areas of continuous permafrost distribution. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 200–207. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3832.
12. Yamilov M.Z., Pshenin V.V., Matveev D.S., Podlesniy D.S., Bezimyannikov T.I. The use of compact inspection devices for monitoring the technical condition of pipelines in protective cases. *Neftyanoe Khozyaystvo-Oil Industry*, 2022, vol. 2, pp. 106–110. In Rus. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-2-106-110
13. Bolobov V.I., Latipov I.U., Popov G.G., Buslaev G.V., Martynenko Ya. V. Estimation of the influence of compressed hydrogen on the mechanical properties of pipeline steels. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 19, pp. 1–27. Available at: <https://doi.org/10.3390/en14196085> (accessed 15 December 2022).
14. Dvornikov M., Buslaev G., Kunshin A., Sidorov D., Kraslawski A., Budovskaya M. New concepts of hydrogen production and storage in Arctic region. *Resources*, 2021, vol. 10. DOI: 10.3390/resources10010003.

15. Murray J.W., Clare A.T. Repair of EDM induced surface cracks by pulsed electron beam irradiation. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, vol. 212, no. 12, pp. 2642–2651. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.07.018.
16. Adeleke A.A., Ikubanni P.P., Orhadahwe T.A., Aweda J.O., Odusote J.K., Agboola O.O. Microstructural assessment of AISI 1021 steel under rapid cyclic heat treatment process. *Results in Engineering*, 2019, vol. 4, pp. 100044. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2019.100044> (accessed 15 December 2022).
17. Brover A.V. Kompleks mekhanizmov uprochneniya metallicheskih materialov pri impulsnoy lazernoy obrabotke [Complex of mechanisms for strengthening metallic materials during pulsed laser processing]. *Perspektivnye Materialy*, 2008, vol. 1, pp. 63–69.
18. Yu J., Zhang H., Deng D., Hao S., Iqbal A. Numerical calculation and experimental research on crack arrest by detour effect and joule heating of high pulsed current in remanufacturing. *Chinese journal of mechanical engineering*, 2014, vol. 27, no. 4, pp. 745–753. DOI: 10.3901/CJME.2014.0414.075
19. Liu T.J.C. Thermo-electro-structural coupled analyses of crack arrest by Joule 4353 heating. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2008, vol. 49, no. 2, pp. 171–184. DOI: 10.1016/j.tafmec.2007.12.001.
20. Yuan C.L., Zhong Y.X. Self-healing mechanism of inner crack in plastic deformation under high temperature. *Journal of Plasticity Engineering*, 2006, vol. 13, pp. 53–57.
21. Lu J.Z., Zhong J.S., Luo K.Y., Zhang L., Qi H., Luo M., Xu X.J., Zhou J.Z. Strain rate correspondence of fracture surface features and tensile properties in AISI304 stainless steel under different LSP impact time. *Surface and Coatings Technology*, 2013, vol. 221, pp. 88–93. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.01.031.
22. Finkel V.M., Golovin Yu.I., Sletkov A.A. O vozmozhnosti tormozheniya bystrykh treshchin impulsami toka [Possibility of braking rapid cracks by pulses of current.] *Soviet Physics Doklady*, 1976, vol. 21, no. 4, pp. 216–222.
23. Finkel V.M., Ivanov V.M., Golovin Yu.I., Crack healing in metals by crossed electric and magnetic fields. *Strength of Materials*, 1983, vol. 15, no. 4, pp. 501–506. DOI: 10.1007/BF01522429
24. Ovchinnikov I.V. Opredelenie resursa plastichnosti pri vozdeystviy toka [Determination of the plasticity resource under the action of current]. *Problemy prochnosti*, 1993, vol. 6, pp. 54–59.
25. Kukudzhinov K.V., Levitin A.L. Processes of transformation and interaction of microcracks in a metal under the influence of a high-energy pulsed electromagnetic field. *Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*, 2016, vol. 2, pp. 89–110. In Rus. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.2.07.
26. Kukudzhinov K.V., Kolomiets-Romanenko A.V. Study of the influence of electric current dynamical action on mechanical properties of materials with ordered structure of defects. *Mechanics of Solids*, 2010, vol. 45, no. 3, pp. 465–475. In Rus. DOI: 10.3103/S0025654410030167.
27. Song H., Wang Z., Gao Ti. Effect of high density electropulsing treatment on formability of TC4 titanium alloy sheet, *Trans. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, vol. 17, pp. 87–92. DOI: 10.1016/S1003-6326(07)60053-3
28. Zuev L.B., Tsellermaer V.Ya., Gromov V.E., Muravev V.V. Ultrasonic monitoring of the accumulation of aging damage and recovery of the useful lifetime of industrial parts. *Technical Physics*, 1997, vol. 49, no. 2, pp. 1094–1096. DOI: 10.1134/1.1258774
29. Zuev L.B., Sosnin O.V., Chirakadze D.Z., Gromov V.E., Muravev V.V. Acoustic evaluation of the endurance of steel specimens and recovery of their serviceability. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1998, vol. 39, no. 4, pp. 639–641. DOI: 10.1007/BF02471262
30. Rastvorova I. I., Demidovich V. B. Utilization of induction heating in the processing of titanium. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 6, pp. 1062–1068.
31. Wang Y., Gao H., Li Z., Ping Y., Jin Z., Hong Z. Study of the temperature uniformity of aluminium billets heated by superconducting DC induction heaters. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2015. DOI: 10.1108/COMPEL-03-2014-0076
32. Chen X. Zhu R., Gao H., Xu W., Xiao G., Xu W. A microstructural study on the alkali-treated titanium subjected to induction heating. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 20, pp. 281–290. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.07.088
33. Kukudzhinov K.V., Levitin A.L. Modeling the healing of microcracks in metal stimulated by a pulsed high-energy electromagnetic field. P. I. *Nanomechanics Science and Technology: An International Journal*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 233–250. DOI: 10.1615/NanomechanicsSciTechnolInt.v6.i3.60
34. Talalaev A.K. *Induktory i ustanovki dlya magnitno-impulsnoy obrabotki metallov* [Inductors and systems for magnetic pulse treatment of metals]. Moscow, NTC Informtekhnika Publ., 1992. 143 p.
35. Kukudzhinov K.V. Modeling the impact of a high-energy pulsed electromagnetic field on microcracks in a polycrystalline metal. *Perm National Research Polytechnic University. Mechanics*, 2015, no. 4, pp. 138–158. In Rus. DOI: 10.15593/perm.mech/2015.4.09
36. Kurlaev N.V., Gulidov A.I., Yudaev V.B., Ryngach N.A. Modelirovanie vozdeystviya IMP na nesploshnosti v strukture materialov detaley [Modeling the impact of a pulsed-magnetic field on discontinuities in the structure of materials]. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, 2003, vol. 2, pp. 80–86.
37. Kurlaev N.V., Merzhievsky L.D., Yudaev V.B., Ryngach N.A. Vliyaniye impulsnoy obrabotki na defekty sploshnosti i dolgovechnost materialov [Influence of pulsed treatment on continuity defects and durability of materials]. *Nauchny vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2002, vol. 18, pp. 97–110.
38. Kurlaev N.V., Gulidov A.I., Ryngach N.A., Krasovsky V.V. Smykanie nesploshnostey v strukture materialov detaley pri magnitno-impulsnoy obrabotke [Closure of discontinuity defects of materials during magnetic-pulse processing]. *Nauchny vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2002, vol. 1, no. 12, pp. 131–140.
39. Baake E., Shpenst V.A. Recent scientific research on electrothermal metallurgical processes. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 240, pp. 660–668. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.660
40. Tsurkin V.N., Cherepovskiy S.S. Experimental study on the impact of key parameters of melt magnetic-pulse treatment on the electromagnetic pressure. *Foundry production and metallurgy*, 2017, vol. 1, no. 68, pp. 115–122. In Rus.
41. Belevitin V.A. *Izmereniye udarnoy vyazkosti metallov i splavov: metodicheskie rekomendatsii* [Measurement of impact strength of metals and alloys: guidelines]. Chelyabinsk, South Ural State Humanitarian and Pedagogical University Publ. House, 2022. 36 p.

Received: 9 January 2023.

Reviewed: 16 March 2023.

#### Information about the authors

**Andrey M. Shipachev**, Dr. Sc., professor, St. Petersburg Mining University.

**Mohammed Aljadly**, postgraduate student, St. Petersburg Mining University.

УДК 628.1.033

## ТОКСИЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ СЕВЕРНЫХ РАЙОНОВ ОБЬ-ЗАЙСАНСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

Максимова Анастасия Алексеевна<sup>1,2</sup>,  
rock.nastaya64@gmail.com

Черных Анатолий Витальевич<sup>1</sup>,  
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

Новиков Дмитрий Анатольевич<sup>1,2</sup>,  
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Дульцев Федор Федорович<sup>1</sup>,  
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

Деркачев Антон Сергеевич<sup>1</sup>,  
a.derkachev@g.nsu.ru

Сухорукова Анна Федоровна<sup>1,2</sup>,  
SukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru

Никитенков Алексей Николаевич<sup>3</sup>,  
sputnik70@yandex.ru

Хвощевская Альбина Анатольевна<sup>3</sup>,  
unpc\_voda@mail.ru

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6.

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский университет,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** данного исследования заключается в необходимости изучения распределения элементов первого класса опасности, урана и тория в подземных водах Обь-Зайсанской складчатой области.

**Цель:** установить характеристики гидрогеохимического фона и изучить распределение высокотоксичных химических элементов в водах питьевого водоснабжения населения.

**Методы.** Выполнено определение быстроизменяющихся параметров с помощью полевой гидрогеохимической лаборатории и полевого оборудования Hanna HI98195 – мультипараметровый измеритель pH/ОВП/проводимости, Hanna HI98198 – оксиметр. Измерение активности радона в подземных водах проводилось с помощью комплекса «Альфарад плюс». Лабораторное изучение химического состава определялось методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Оценка токсикологических особенностей вод проводилась с использованием действующих нормативных документов: СанПиН 2.1.3684-21, ГОСТ Р 58573-2019, и рекомендаций Всемирной организации по здравоохранению. Расчет гидрогеохимического фона проводился в программном комплексе Statistica 8.0 (StatSoft. Inc.). Для выявления степени концентрирования химических элементов в природных водах были рассчитаны коэффициенты концентрации  $K_{Kj} = \frac{m_x}{n_x}$  и водной миграции (по А.И. Перельману)  $K_{X1} = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x}$ . Кумулятивные кривые рассчитаны по формуле:  $P_c = R_i / (N + 1)$ .

**Результаты.** Изученны воды  $\text{HCO}_3 \text{ Mg-Ca}$  и  $\text{HCO}_3 \text{ Na-Mg-Ca}$  состава с величиной общей минерализации, варьирующей от 203 до 1568 мг/дм<sup>3</sup>; геохимические параметры среды, как восстановительные, так и окислительные, с Eh –331,6 – +438,5 мВ, pH 6,6–8,3 с содержанием  $\text{O}_{2\text{раств.}}$  0,29–10,72 мг/дм<sup>3</sup>. Выявлены относительно высокие концентрации Ti до 0,04 мг/дм<sup>3</sup>, V до 0,03 мг/дм<sup>3</sup>, Fe до 93,9 мг/дм<sup>3</sup>, Zn до 0,38 мг/дм<sup>3</sup>, As до 0,27 мг/дм<sup>3</sup>, Zr до 0,018 мг/дм<sup>3</sup>, Sb до 0,016 мг/дм<sup>3</sup>, Ba до 0,51 мг/дм<sup>3</sup>, W до 0,005 мг/дм<sup>3</sup>, Hg до 0,0002 мг/дм<sup>3</sup>, Pb до 0,057 мг/дм<sup>3</sup>, U до 0,34 мг/дм<sup>3</sup>, что может быть связано как с автомобильным транспортом и промышленными предприятиями, так и с водовмещающими породами. Изучены элементы первого класса опасности, а также уран и торий. Установлено, что по бериллию, а также по таллию и мышьяку 20 % изученных проб выше фоновое значения, по торию – 26 %, по урану – 19 %.

### Ключевые слова:

Гидрогеохимия, элементы первого класса опасности, факторы загрязнения, Обь-Зайсанская складчатая область, Западная Сибирь.

### Введение

В изучаемом регионе плотность населения и расположение промышленных предприятий весьма неоднородны. Имеются природные территории, расположенные в пределах крупнейшей в России Новосибирской городской агломерации, с общей численностью населения более 2 млн человек. Часть неизменных ландшафтов фактически не охвачена деятельностью человека и характеризуется низкой антропогенной нагрузкой. В последние десятилетия в

науках о Земле и их разделе – гидрогеохимии – большое внимание уделяется анализу геохимических особенностей подземных вод, использующихся для целей питьевого водоснабжения населения. Из-за увеличивающейся антропогенной нагрузки многократно возросла проблема с ресурсами чистых подземных вод особенно в странах Азиатско-Тихоокеанского региона [1–3], Африки [4, 5] и Латинской Америки [6, 7]. Огромное внимание уделяется изучению высокотоксичных химических элементов [8, 9] и органических соединений [10].

В этой связи актуальность настоящего исследования не вызывает сомнений. В настоящей работе впервые представлены сведения по распределению в подземных водах северных районов Обь-Зайсанской складчатой области элементов первого класса опасности, а также урана и тория. Для вод, эксплуатирующихся в целях питьевого водоснабжения населения, также установлены характеристики гидрогеохимического фона и аномалий.

#### Материалы и методы

В ходе экспедиционных работ в весенне-осенний период 2022 г. было отобрано 202 пробы подземных вод в пределах Обь-Зайсанской складчатой области (рис. 1, а). На месте отбора проб проводилось определение pH, Eh, температуры, содержания растворенного  $O_2$  и  $HCO_3^-$  на приборной базе мультипараметрового измерителя pH/ОВП/проводимости Hanna HI98195 и оксиметра Hanna HI98198. Измерение содержаний радона в подземных водах проводилось с помощью комплекса «Альфарад плюс» в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН. Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета (аналитики В.В. Куровская, А.С. Погуца, Э.С. Шведская, Ю.Ф. Татарская, М.А. Глушкова). Оценка токсикологических особенностей вод прово-

дилась с использованием действующих нормативных документов: СанПиН 2.1.3684-21, ГОСТ Р 58573-2019, и рекомендаций Всемирной организации по здравоохранению [11–13]. Расчет гидрогеохимического фона (средняя из наиболее часто встречающихся концентраций того или иного компонента в подземных водах) проводился в программном комплексе Statistica 8.0 (StatSoft. Inc.) с использованием функции Descriptive Statistics с расчетами средних, медианных, минимальных и максимальных значений с учетом стандартного отклонения (таблица).

Для выявления степени концентрирования химических элементов в подземных водах были рассчитаны коэффициенты концентрации ( $K_k$ ) и водной миграции по А.И. Перельману ( $K_{x1}$ ) [14]. Первый рассчитывается как  $K_k = \frac{m_x}{n_x}$ , где  $m_x$  – содержание элемента в воде;  $n_x$  – кларк литосферы в % (по Н.А. Григорьеву [15]). Второй:  $K_{x1} = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x}$ , где  $m_x$  – содержание элемента в воде ( $mg/dm^3$ );  $a$  – минерализация ( $mg/dm^3$ ) и  $n_x$  – кларк литосферы в %.

Кумулятивные кривые ранжированы от меньшего к большему и рассчитаны по формуле  $Pc = Ri/(N+1)$ , где  $Ri$  – номер ранга наблюдения,  $N$  – порядковый номер. Также был рассчитан фактор загрязнения CF (contamination factor) [16, 17], который показывает отношение элемента в воде к фоновому значению и классифицируется следующим образом:  $CF < 1$  – низкое загрязнение,  $1 < CF < 3$  – умеренное,  $3 < CF < 6$  – высокое,  $CF > 6$  – очень высокое.

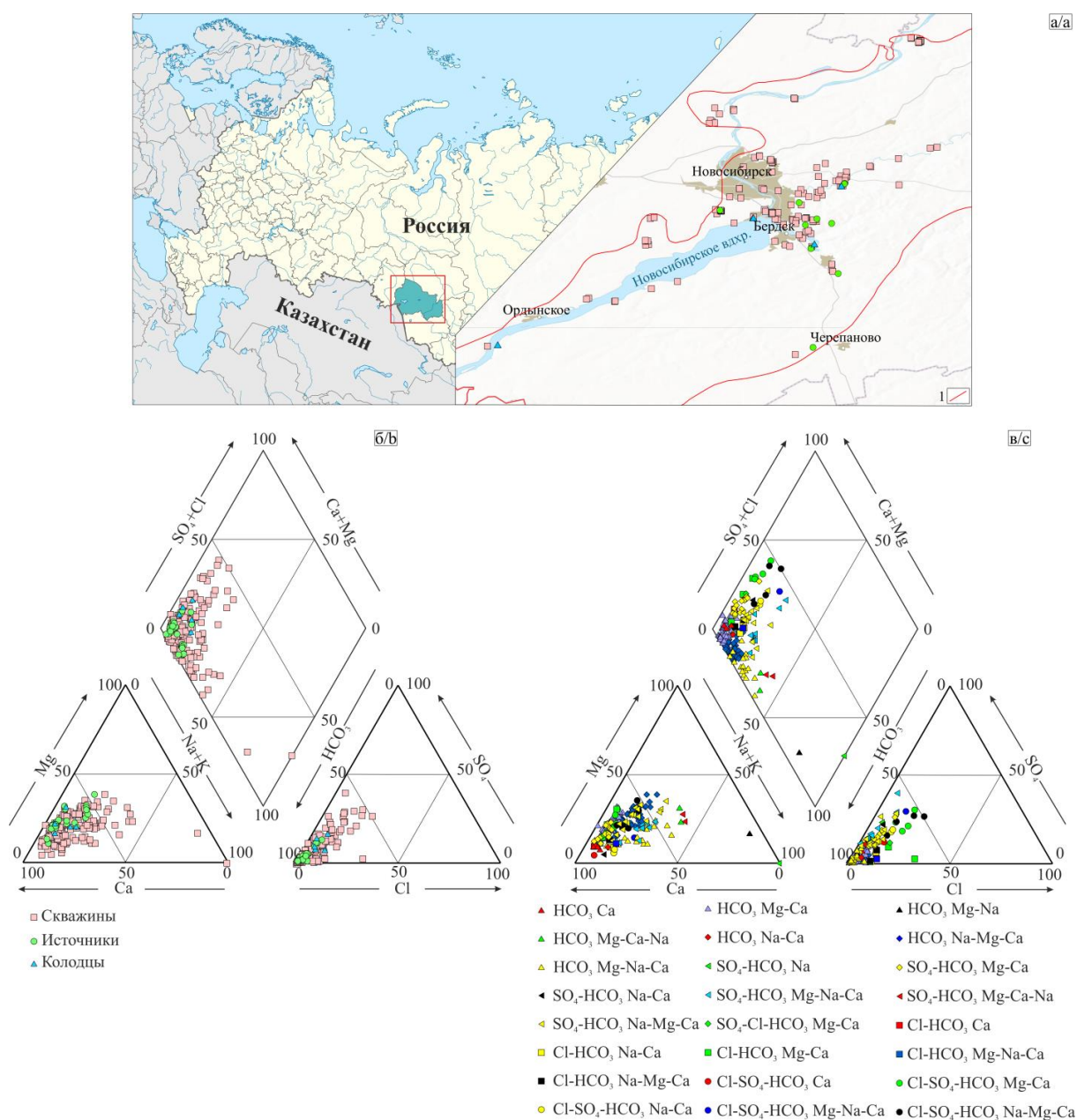
**Таблица.** Статистические параметры основных элементов 265 проб подземных вод Обь-Зайсанской складчатой области

**Table.** Statistical parameters of the main elements of 265 groundwater samples of the Ob-Zaisan folded area

Компоненты состава Composition components	Фон Back-ground	Медиана Median	Стандартное отклонение Standard deviation	Кол-во измерений Number of measurements	Сумма Total	Мин. Min	Макс. Max	25 %	75 %
$HCO_3^-$	403	398	95	202	81320	80	710	354	464
$SO_4^{2-}$	29	15	37	200	5873	1,83	332	7	44
$Cl^-$	12	6	16	202	2438	0,32	128	3	16
$Ca^{2+}$	99	96	29	202	19923	0,20	288	84	108
$Mg^{2+}$	22	20	10	202	4431	0,23	60	16	27
$Na^+$	24	17	24	202	4897	0,34	174	9	33
$K^+$	2	1	2	202	325	0,09	28	0,68	1,77
$M^*$	601	585	159	202	121440	127	1568	514	682
$NH_4$	0,93	0,05	6,61	122	113	0,01	72	0,03	0,26
$NO_2$	0,19	0,01	0,56	91	18	0,0008	3,14	0,01	0,05
$NO_3$	19	2	49	180	3394	0,0044	482	0,39	14
$PO_4$	0,33	0,10	0,44	122	41	0,0130	1,47	0,03	0,64
Be	$1,54 \cdot 10^{-5}$	0	$5,34 \cdot 10^{-5}$	157	0,002	0	$5,36 \cdot 10^{-4}$	0	$6,58 \cdot 10^{-6}$
As	0,0074	0,0005	0,0238	201	1,50	$1,68 \cdot 10^{-5}$	0,269	0,0003	0,004
Hg	$2,06 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$	$2,54 \cdot 10^{-5}$	123	0,0025	0	$1,58 \cdot 10^{-4}$	0	$3,06 \cdot 10^{-3}$
Tl	$5,79 \cdot 10^{-6}$	$2,11 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	151	$8,74 \cdot 10^{-4}$	0	$8,22 \cdot 10^{-5}$	$4,91 \cdot 10^{-7}$	$5,36 \cdot 10^{-6}$
Th	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$5,19 \cdot 10^{-6}$	$2,94 \cdot 10^{-5}$	153	0,0020	0	$3,08 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-6}$	$1,24 \cdot 10^{-3}$
U	0,0089	0,0025	0,0311	197	1,76	0	0,34	$5,73 \cdot 10^{-4}$	0,0056

Примечание: содержания указаны в  $mg/dm^3$ ;  $M^*$  – минерализация.

Note: contents are indicated in  $mg/dm^3$ ;  $M^*$  – mineralization.



**Рис. 1.** Местоположение изученных объектов (а), диаграммы Пайпера химического состава подземных вод (б, в).  
1 – граница Обь-Зайсанской складчатой области

**Fig. 1.** Location of the studied objects (a), Peiper diagrams of the chemical composition of groundwater (b, c). 1 – boundary of the Ob-Zaisan folded region

### Геологическое строение

Территория исследования расположена в пределах Обь-Зайсанской складчатой области, где распространены юрско-девонские отложения. Породы юрского возраста представлены преимущественно песчаниками, алевролитами, аргиллитами и бурыми или каменными углями. Отложения каменноугольной системы сложены аргиллитами, алевролитами, тонкослоистыми песчаниками и известняками. Девонские отложения представлены алевролитами, аргиллитами, полимиктовыми песчаниками, глинистыми сланцами, андезитами, их туфами, базальтами, туфопесчаниками, известняками. На северо-западе области распростра-

нены гранитоиды второй фазы приобского комплекса (Р<sub>3</sub>-Т<sub>1</sub>) и первой фазы барлакского комплекса (Т<sub>1-2</sub>).

Приобский комплекс включает в себя несколько фаз внедрения со сравнительно простым породным составом. Первую фазу составляют диориты, кварцевые диориты, их умеренно-щелочные аналоги, которые развиты на ограниченной территории. Главная фаза включает в себя умеренно-щелочные биотитроговообманковые граниты с директивными текстурами и граносиениты [18]. Вторая фаза приобского комплекса составляет крупный Новосибирский массив, представленный второй фазой, сложенной биотитовыми и биотит-амфиболовыми гранитами, субщелочными двуполевошпатовыми гранитами, реже лейко-



гранитами. Барлакский комплекс имеет монотонный состав, который представлен серыми двуполевошпатовыми среднезернистыми биотитовыми лейкогранитами и гранит-порфирами.

### Результаты и обсуждения

#### Геохимическая характеристика подземных вод

Были изучены подземные воды на территории Обь-Зайсанской складчатой области. Пробы отбирались из трех групп водопунктов: 1) скважин (174 пробы), 2) источников (23 пробы) и 3) колодцев (5 проб).

Так, воды первой и наиболее многочисленной группы в основном гидрокарбонатного магниево-кальциевого состава (рис. 1, б, в) с величиной общей минерализации 127–1568 мг/дм<sup>3</sup>. Eh среды изменяется от восстановительной (–331,6 мВ) до окислительной (+438,5 мВ) обстановки, значения pH составляют 6,6–8,0, а содержание O<sub>2</sub>раств. 0,29–10,43 мг/дм<sup>3</sup>. В них выявлены высокие концентрации (мг/дм<sup>3</sup>): Mn (в среднем 0,55), Fe (в среднем 2,44), As (в среднем 0,008), Sb (в среднем 0,0005), W (в среднем 0,0002), Hg (в среднем 0,00002), Pb (в среднем 0,0008) и U (в среднем 0,010). Можно предположить концентрирование и накопление Se (Kki=0,02), Br (Kki=0,02), Te (Kki=0,01) и I (Kki=0,15) в изученных водах. Установлено, что в изученных объектах ряд миграционной способности химических элементов имеет следующий вид: очень сильно миграционно способны: I>Br>Se>Te>B; сильно: Re>As>U>Au>Sr>Mo>Sb; средние: Mn>Pd>Li>Zn>Hg>P>Ba>W>Sc>Cd>Cu>Cr>Co. Таким образом, в этой группе вод относительно высокая минерализация (более 1 г/дм<sup>3</sup>) выявлена в водозаборных скважинах Ярковского сельсовета (Новосибирский район Новосибирской области (НСО)) и р.п. Колывань (Колыванский район НСО). Загрязнение нитратами (45,6–482 мг/дм<sup>3</sup>) установлено в подземных водах преимущественно Новосибирского, Болотнинского и Маслянинского районов НСО. Такие высокие концентрации NO<sub>3</sub>, вероятно, связаны с работой эксплуатируемых карьеров (взрывные вещества), которые находятся в непосредственной близости от изученных объектов, и сельскохозяйственной деятельностью населения. Как правило, источниками высоких содержаний Fe, As, Zr, Sb, W, Hg, Pb, U в подземных водах выступают: автомобильный транспорт, промышленные предприятия или водовмещающие породы, но это требует проверки в каждом конкретном случае. Наиболее высокие концентрации U (0,015–0,338 мг/дм<sup>3</sup>) выявлены в скважинах глубиной 20–153 м, воды которых с геохимических позиций можно отнести к группе трещинно-жильных гранитоидов [19–22].

Воды второй группы по составу в основном отвечают HCO<sub>3</sub> Mg-Ca (рис. 1, б, в) с величиной общей минерализации 389–714 мг/дм<sup>3</sup>. Геохимическая обстановка изменяется от восстановительной (Eh –92,0 мВ) до окислительной (+235,2 мВ), pH нейтральный и слабощелочной (7,1–8,3), а содержание O<sub>2</sub>раств. составляет 0,52–10,72 мг/дм<sup>3</sup>. В водах предположительно могут накапливаться Se (Kki=0,02), Br (Kki=0,02), Te

(Kki=0,01) и I (Kki=0,07). Очень сильной миграционной способностью в растворе обладают I, Br, Se, Te, B; сильной: Re, U, Sr, As, Mo. При этом в подземных водах выявлены превышения по бериллию над фоновыми концентрациями (фон 1,54·10<sup>–5</sup> мг/дм<sup>3</sup>) в Новосибирском районе в 5 раз, в Искитимском в 4; по мышьяку (фон 7,44·10<sup>–3</sup> мг/дм<sup>3</sup>) в Искитимском районе в три раза; по таллию (фон 5,79·10<sup>–6</sup> мг/дм<sup>3</sup>) и торию (фон 1,31·10<sup>–5</sup> мг/дм<sup>3</sup>) в три раза в Новосибирском районе.

Воды третьей группы гидрокарбонатного магниево-кальциевого и сульфатно-гидрокарбонатного магниево-кальциевого состава (рис. 1, б, в) умеренно и собственно пресные (минерализация 339–661 мг/дм<sup>3</sup>). Геохимическая обстановка окислительная с Eh +130,4 – +205,3 мВ, по водородному показателю воды нейтральные и слабощелочные (pH 7,2–7,6) с содержанием растворенного кислорода 2,77–6,52 мг/дм<sup>3</sup>. Выявлены высокие концентрации (мг/дм<sup>3</sup>): Al до 0,115; Ti до 0,0029; V до 0,0012; Cr до 0,019; Ni до 0,0064; Cu до 0,0090; Zn до 0,075; Ba до 0,121. По коэффициентам концентрации установлено, что в водах накапливаются Se (Kki=0,05); Br (Kki=0,03); Te (Kki=0,01); I (Kki=0,06). В изученных водах I, Br, Se, Te, B имеют очень сильную миграционную способность; Sr, U, Mo, As, Zn – сильную; Sb, Li, Au, Cr, Pd, Sc, Ba, Cu, Ni, Cd, Mn, Sn – среднюю. Эти тенденции контролируются как химическими свойствами самих элементов, так и процессами взаимодействия вод с вмещающими горными породами.

#### Распределение элементов первого класса опасности, U и Th

В работе рассмотрены элементы первого класса опасности, наиболее пагубно влияющие на организм человека: допустим, большое количество и длительное воздействие бериллия, который ослабляет и разрушает костную ткань, поражает лёгкие; мышьяка, который приводит к развитию рака и поражениям кожи; ртути, которая поражает нервную, пищеварительную и иммунную системы; таллия – периферическую нервную систему, желудочно-кишечный тракт и почки.

Применение методов математической статистики позволило рассчитать кумулятивные кривые (рис. 2) для элементов первого класса опасности, урана и тория, которые отражают процентные значения меньше эталона. В нашем случае эталоном выступает фоновое значение.

В изученных водах по бериллию 20 % проб находятся выше фонового значения (рис. 2, а) и 1 % выше ПДК. На картах распределения коэффициента CF выявлены аномалии, находящиеся преимущественно на территориях г. Новосибирска и Новосибирского района НСО (рис. 3, а). Эти аномалии находятся близ гранитоидных массивов, и их появление характеризуется природными факторами. По таллию (рис. 2, б) 20 % проб выше фоновых значений и 1 % выше ПДК. Высокие значения таллия выявлены в г. Новосибирске и в Новосибирском районе. Все превышения выявлены рядом с эксплуатируемыми карьерами, а так-



же с гранитоидными массивами (рис. 3, б). По мышьяку значения 20 % проб выше фонового (рис. 2, в) и 16 % превышают ПДК. На всей исследуемой территории отмечаются повышенные содержания мышьяка (рис. 3, в), но особенно стоит выделить объекты в СНТ Маяк (г. Новосибирск, Советский район: As 0,013–0,085 мг/дм<sup>3</sup>), СНТ Химик, с. Сенчанка (Ново-

сибирский район: As 0,032 и 0,019 мг/дм<sup>3</sup> соответственно), СНТ Лесное-1 (Тогучинский район: As 0,036 мг/дм<sup>3</sup>). Содержания тория в 26 % проб выше фона (рис. 2, г). Высокие значения CF выявлены в Кировском и Советском районах г. Новосибирска (рис. 3, з).

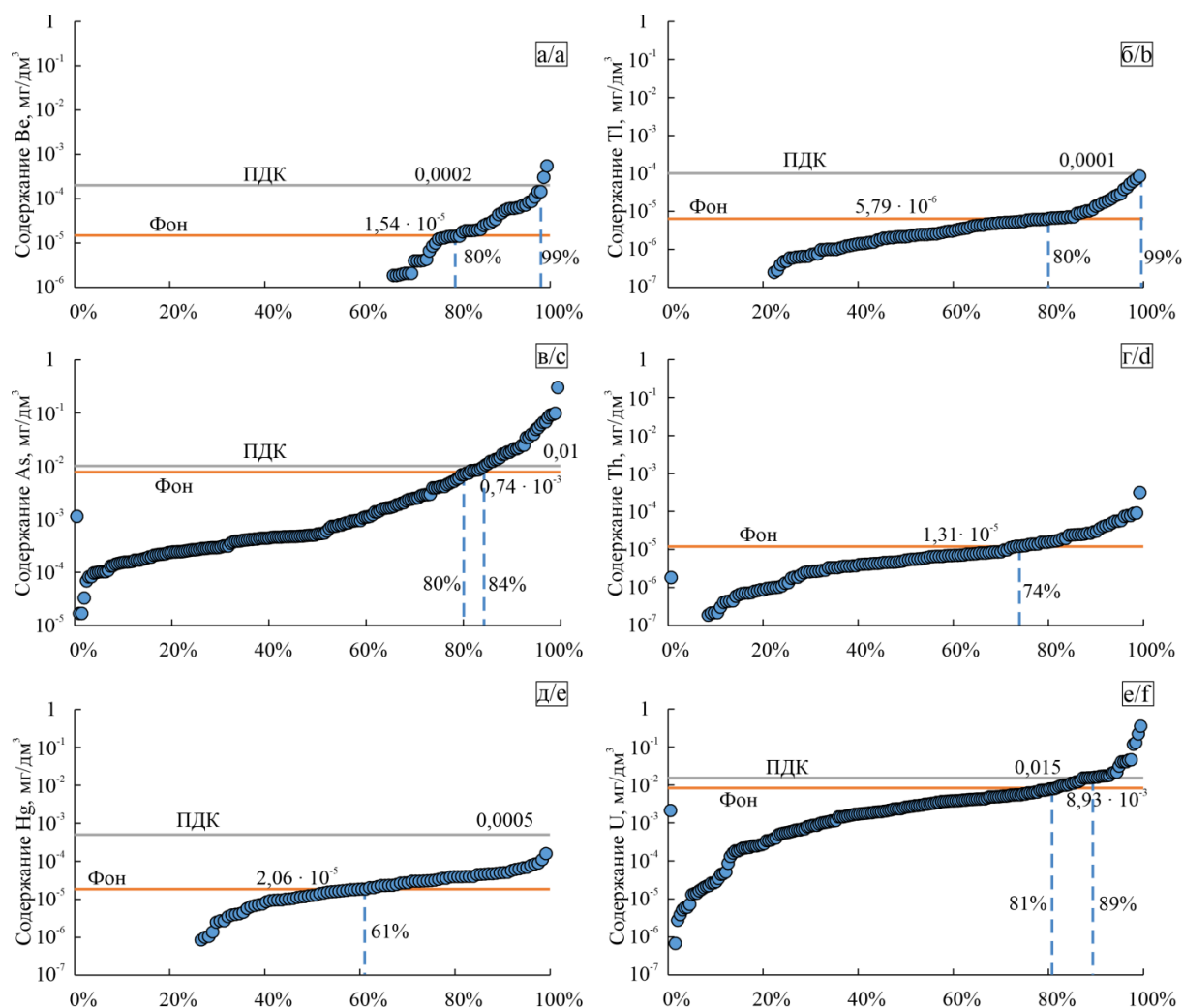
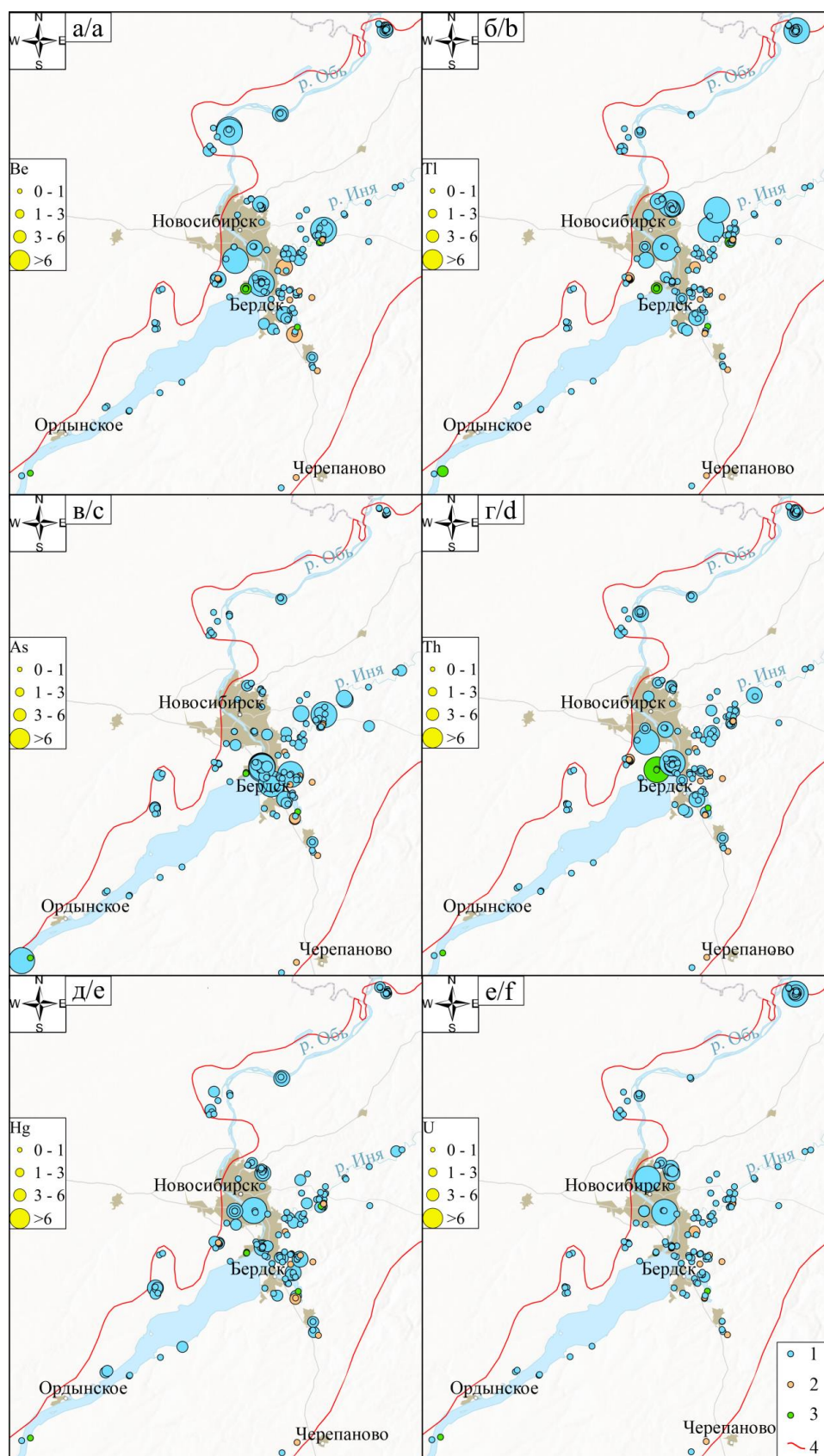


Рис. 2. а–е) кумулятивные кривые для элементов первого класса опасности, урана и тория в подземных водах

Fig. 2. а–f) cumulative curves for elements of the first hazard class, uranium and thorium in groundwater

Концентрации ртути, превышающие фон, обнаружены в 39 % проб (рис. 2, д), но не превышают ПДК. Значительные превышения выявлены в Октябрьском районе г. Новосибирска (рис. 3, д) близ разрабатываемого карьера Борок. Содержания урана, превышающие фон, выявлены в 19 % изученных проб (рис. 2, е), превышающие ПДК – в 11 %. Все аномалии выявлены в г. Новосибирске (рис. 3, е), где расположен одноименный гранитоидный массив, в минералах которого (монацит, циркон, флюорит и др.) присутствует уран.

Таким образом, по фактору загрязнения CF установлено, что в среднем в 82 % проб не выявлены повышенные концентрации элементов первого класса опасности, урана и тория. Если использовать изначальный смысл фактора CF, то низкая степень загрязнения отмечается в 12 % проб, средняя – в 4 % и сильная – в 2 %. Причины этого лежат в минералогических особенностях водовмещающих пород и требуют дополнительных исследований их геохимических особенностей.



**Рис. 3.** Карты-схемы распределения коэффициента CF по элементам первого класса опасности, урана и тория на территории Обь-Зайсанской складчатой области: 1 – скважины; 2 – источники; 3 – колодцы; 4 – граница Обь-Зайсанской складчатой области

**Fig. 3.** Schematic maps of the distribution of the CF coefficient for elements of the first hazard class, uranium and thorium on the territory of the Ob-Zaisan folded region: 1 – wells; 2 – springs; 3 – draw-well; 4 – boundary of the Ob-Zaisan folded region

### Заключение

Из вышенаписанного следует, что в целом подземные воды исследуемого региона по составу гидрокарбонатные магниево-кальциевые и гидрокарбонатные натриево-магниево-кальциевые, изменяются от умеренно пресных (минерализация 203 мг/дм<sup>3</sup>) до слабосолоноватых (минерализация 1568 мг/дм<sup>3</sup>). Геохимическая обстановка как восстановительная (Eh –331,6 мВ), так и окислительная (Eh +438,5 мВ), по водородному показателю воды нейтральные (рН 6,6) и слабощелочные (рН 8,3) с содержанием растворенного кислорода 0,29–10,72 мг/дм<sup>3</sup>. Выявлены относительно высокие концентрации Ti до 0,04 мг/дм<sup>3</sup>, V до 0,03 мг/дм<sup>3</sup>, Fe до 93,9 мг/дм<sup>3</sup>, Zn до 0,38 мг/дм<sup>3</sup>, As до 0,27 мг/дм<sup>3</sup>, Zr до 0,018 мг/дм<sup>3</sup>, Sb до 0,016 мг/дм<sup>3</sup>, Ba до 0,51 мг/дм<sup>3</sup>, W до 0,005 мг/дм<sup>3</sup>, Hg до 0,0002 мг/дм<sup>3</sup>, Pb до

0,057 мг/дм<sup>3</sup>, U до 0,34 мг/дм<sup>3</sup>. Высокие концентрации приведенных элементов связаны прежде всего с составом вмещающих пород, а во вторую очередь с большим количеством промышленных предприятий, развитых на изучаемой территории. В работе были изучены элементы первого класса опасности, а также уран и торий. Установлено, что по бериллию, таллию, мышьяку 20 % изученных проб выше фонового значения, по торию –26 %, по урану – 19 %.

*Полевые работы выполнены при финансовой поддержке проектов Министерства науки и высшего образования РФ №№ FWZZ-2022-0014, FSWW-2023-0008, аналитические работы по изучению химического состава подземных вод, обоснованию гидрогеохимического фона и аномалий – при поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chotpantara S., Thamrongsrisakul J. Natural and anthropogenic factors influencing hydrochemical characteristics and heavy metals in groundwater surrounding a gold mine, Thailand // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2021. – V. 211. – № 15. – Article 104692.
2. Wang H., Yang Q., Liang J. Interpreting the salinization and hydrogeochemical characteristics of groundwater in Dongsan Island, China // *Marine Pollution Bulletin*. – 2022. – V. 178. – Article 113634.
3. Vulnerability of groundwater from elevated nitrate pollution across India: insights from spatio-temporal patterns using large-scale monitoring data / S. Sarkar, A. Mukherjee, S. Duttagupta, N.S. Bhanja, A. Bhattacharya, S. Chakraborty // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2021. – V. 243. – Article 103895.
4. Mukonazwothe M., Muniyai L.F., Mutoti M.I. Groundwater quality evaluation for domestic and irrigation purposes for the Nwanedi Agricultural Community, Limpopo Province, South Africa // *Heliyon*. – 2022. – V. 8. – Iss. 4. – Article e09203.
5. Groundwater quality assessment and application of multivariate statistical analysis in Luvuvhu catchment, Limpopo, South Africa / V. Elumalai, V.G. Nethononda, V. Manivannan, N. Rajmohan, P. Li, L. Elango // *Journal of African Earth Sciences*. – 2020. – V. 171. – Article 103967.
6. Seven potential sources of arsenic pollution in Latin America and their environmental and health impacts / J. Bundschuh, J. Schneider, M.A. Alam, N.K. Niazi, I. Herath, F. Parvez, B. Tomaszewska, L.R.G. Guilherme, J.P. Maity, D.L. López, A.F. Cirelli, A. Pérez-Carrera, N. Morales-Simfors, M.T. Alarcón-Herrera, P. Baisch, D. Mohan, A. Mukherjee // *Science of The Total Environment*. – 2021. – V. 780. – № 1. – Article 146274.
7. Statistical evaluation of fluoride contamination in groundwater resources of Santiago del Estero Province, Argentina / K. Rondano Gómez, C.E. López Pasquali, G. Paniagua González, P. Fernández Hernando, R.M. Garcinuño Martínez // *Geoscience Frontiers*. – 2020. – V. 11. – Iss. 6. – P. 2197–2205.
8. Naturally occurring potentially toxic elements in groundwater from the volcanic landscape around Mount Meru, Arusha, Tanzania and their potential health hazard / I. Tomašek, H. Mouri, A. Dille, G. Bennett, P. Bhattacharya, N. Brion, M. Elskens, K. Fontijn, Y. Gao, P.K. Gevera, J. Ijumulana, M. Kisaka, M. Leermakers, C. Shemsanga, K. Walraevens, J. Wragg, M. Kervyn // *Science of The Total Environment*. – 2022. – V. 807. – P. 1. – Article 150487.
9. Heavy metal pollution in groundwater of urban Delhi environs: pollution indices and health risk assessment / K. Sharma, N. Janardhana Raju, N. Singh, S. Sreekesh // *Urban Climate*. – 2022. – V. 45. – Article 101233.
10. Koroša A., Mali N. Control of organic contaminants in groundwater by passive sampling and multivariate statistical analysis // *Journal of Environmental Management*. – 2022. – V. 318. – № 15. – Article 115440.
11. СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий (с изменениями на 26 июня 2021 года). – М.: Государственная дума РФ, 2021. – 65 с.
12. ГОСТ Р 58573-2019. Охрана природы. Гидросфера. Качество воды. Риск-ориентированный контроль. – М.: Стандартинформ, 2010. – 18 с.
13. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. – Geneva: World Health Organization, 2017. – 631 p.
14. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1975. – 342 с.
15. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: УрО РАН, 2009. – 383 с.
16. СП 33-101-2003 Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. – 73 с.
17. Assessment of potentially harmful elements pollution in the Calore River basin (Southern Italy) / D. Zuzolo, D. Cicchella, V. Catani, L. Giaccio, I. Guagliardi, L. Esposito, B. De Vivo // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2017. – № 39. – P. 531–548.
18. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-44 – Новосибирск. Объяснительная записка / Г.А. Бабин, А.И. Черных, А.Г. Головина, С.В. Жигалов, С.С. Долгушин, Е.В. Ветров, Т.В. Кораблева, Н.А. Бодина, Н.А. Светлова, Г.С. Федосеев, А.П. Хилько, В.А. Епифанов, Ю.И. Лоскутов, И.Ю. Лоскутов, М.В. Михаревич, Е.А. Пихурин. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 392 с.
19. Гидрогеология и гидрогеохимия месторождения радоновых вод «Каменское» (г. Новосибирск) / Д.А. Новиков, А.Ф. Сухорукова, Т.В. Корнеева, Р.М. Каменова-Тоцева, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 192–208.
20. Первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований Новобибеевского проявления радоновых вод / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.А. Максимова, А.Н. Пыряев, А.Н. Фаге, А.А. Хвощевская, А.С. Деркачев, А.В. Черных // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 57–72.
21. Об открытии слаборадоновых вод – Инские источники / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, А.Ф. Сухорукова, Л.Г. Вакуленко, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, А.С. Деркачев, А.Н. Фаге, А.А. Хвощевская, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных,

- М.С. Мельгунов, П.Н. Калинин, С.А. Растигеев // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63. – № 12. – С. 1714–1732.
22. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia / D.A. Novikov, Yu.G. Kopylova, A.N. Pyryaev, A.A. Maksimova, A.S. Derkachev, A.F. Sukhorukova, F.F. Dultsev, A.V. Chernykh, A.A. Khvashchevskaya, P.N. Kalinkin, A.V. Petrozhitsky //

Groundwater for Sustainable Development. – 2023. – V. 20. – P. 1–11.

Поступила: 17.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 05.02.2023 г.

#### Информация об авторах

**Максимова А.А.**, инженер лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; ассистент кафедры минералогии и геохимии Новосибирского национального исследовательского университета.

**Черных А.В.**, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Новиков Д.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа и кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

**Дульцев Ф.Ф.**, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Деркачев А.С.**, инженер лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Сухорукова А.Ф.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

**Никитенков А.Н.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Хващевская А.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 628.1.033

## TOXIC ELEMENTS IN GROUNDWATER IN THE NORTHERN REGIONS OF THE OB-ZAYSAN FOLDED REGION

**Anastasia A. Maksimova**<sup>1,2</sup>,  
rock.nastaya64@gmail.com

**Anatoliy V. Chernykh**<sup>1</sup>,  
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

**Dmitry A. Novikov**<sup>1,2</sup>,  
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

**Fedor F. Dultsev**<sup>1</sup>,  
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

**Anton S. Derkachev**<sup>1</sup>,  
a.derkachev@g.nsu.ru

**Anna F. Sukhorukova**<sup>1,2</sup>,  
ukhorukovaAF@ipgg.sbras.ru

**Alexey N. Nikitenkov**<sup>3</sup>,  
sputnik70@yandex.ru

**Albina A. Khvachshevskaya**<sup>3</sup>,  
unpc\_voda@mail.ru

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
3/6, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> Novosibirsk State University,  
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of this research lies in the need to study the distribution of elements of the first hazard class, uranium and thorium in the groundwater of the Ob-Zaisan folded area.

**Objective:** to establish the characteristics of the hydrogeochemical background and to study the distribution of highly toxic chemical elements in the waters of the drinking water supply of the population.

**Methods.** Rapidly changing parameters were determined using a field hydrogeochemical laboratory and field equipment Hanna HI98195 – a multi-parameter pH/ORP/conductivity meter, Hanna HI98198 – an oximeter. The measurement of radon activity in groundwater was carried out using the Alfarad plus complex. Laboratory studies of the chemical composition by means of titration, ion chromatography, mass spectrometry with inductively coupled plasma were carried out at the Research Laboratory of Hydrogeochemistry at the School of Earth Sciences and Engineering of the Tomsk Polytechnic University. The assessment of the toxicological characteristics of waters was carried out using the current regulatory documents: SanPiN 2.1.3684-21, SS R 58573-2019 and the recommendations of the World Health Organization. The hydrogeochemical background was calculated using the Statistica 8.0 software package (StatSoft. Inc.). To determine the extent of element concentrating in natural waters, the coefficients of concentration  $K_k = \frac{m_x}{n_x}$  and water migration (according to A.I. Perelman)

$K_{x1} = \frac{m_x \cdot 100}{a \cdot n_x}$  were calculated. Cumulative curves are calculated by the formula:  $Pc = Ri / (N + 1)$ .

**Results.** The studied waters are  $HCO_3$  Mg-Ca and  $HCO_3$  Na-Mg-Ca composition with total mineralization varying from 203 to 1568 mg/dm<sup>3</sup>. The geochemical parameters of the environment are both reducing and oxidizing with Eh –331,6 – +438,5 mV, pH 6,6–8,3 with the content of  $O_{2disol}$  0,29–10,72 mg/dm<sup>3</sup>. The authors revealed relatively high concentrations of Ti – up to 0,04 mg/dm<sup>3</sup>, V – up to 0,03 mg/dm<sup>3</sup>, Fe – up to 93,9 mg/dm<sup>3</sup>, Zn – up to 0,38 mg/dm<sup>3</sup>, As – up to 0,27 mg/dm<sup>3</sup>, Zr – up to 0,018 mg/dm<sup>3</sup>, Sb – up to 0,016 mg/dm<sup>3</sup>, Ba – up to 0,51 mg/dm<sup>3</sup>, W – up to 0,005 mg/dm<sup>3</sup>, Hg – up to 0,0002 mg/dm<sup>3</sup>, Pb – up to 0,057 mg/dm<sup>3</sup>, U – up to 0,34 mg/dm<sup>3</sup>, which is probably related to the composition of host rocks and the spread of industrial enterprises developed in the study area. The elements of the first hazard class, as well as uranium and thorium, were studied in the work. It was found that 20 % of the studied samples were higher than the background value for beryllium, as well as for thallium and arsenic, 26 % – for thorium, and 19 % – for uranium.

### Key words:

Hydrogeochemistry, elements of the first hazard class, pollution factors, Ob-Zaisan folded region, Western Siberia.

Field work was carried out with the financial support of projects of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation no. FWZZ-2022-0014, FSWW-2023-0008, analytical work on the study of the chemical composition of groundwater, substantiation of the hydrogeochemical background and anomalies – with the support of project no. 22-17-20029 of the Russian Science Foundation and the Government of the Novosibirsk Region.

### REFERENCES

1. Chotpantrana S., Thamrongrisakul J. Natural and anthropogenic factors influencing hydrochemical characteristics and heavy metals in groundwater surrounding a gold mine, Thailand. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, vol. 211, no. 15, article 104692.
2. Wang H., Yang Q., Liang J. Interpreting the salinization and hydrogeochemical characteristics of groundwater in Dongshan Island, China. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, vol. 178, article 113634.
3. Sarkar S., Mukherjee A., Duttagupta S., Bhanja N.S., Bhattacharya A., Chakraborty S. Vulnerability of groundwater from elevated nitrate pollution across India: Insights from spatio-temporal patterns using large-scale monitoring data. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2021, vol. 243, article 103895.
4. Mukonazwothe M., Munyai L.F., Mutoti M.I. Groundwater quality evaluation for domestic and irrigation purposes for the Nwanedi Agricultural Community, Limpopo Province, South Africa. *Helicon*, 2022, vol. 8, Iss. 4, article e09203.

5. Elumalai V., Nethononda V.G., Manivannan V., Rajmohan N., Li P., Elango L. Groundwater quality assessment and application of multivariate statistical analysis in Luvuvhu catchment, Limpopo, South Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 2020, vol. 171, article 103967.
6. Bundschuh J., Schneider J., Alam M.A., Niazi N.K., Herath I., Parvez F., Tomaszewska B., Guilherme L.R.G., Maity J.P., López D.L., Cirelli A.F., Pérez-Carrera A., Morales-Simfons N., Alarcón-Herrera M.T., Baisch P., Mohan D., Mukherjee A. Seven potential sources of arsenic pollution in Latin America and their environmental and health impacts. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 780, no. 1, article 146274.
7. Rondano Gómez K., López Pasquali C.E., Paniagua González G., Fernández Hernando P., Garcinuño Martínez R.M. Statistical evaluation of fluoride contamination in groundwater resources of Santiago del Estero Province, Argentina. *Geoscience Frontiers*, 2020, vol. 11, Iss. 6, pp. 2197–2205.
8. Tomašek I., Mouri H., Dille A., Bennett G., Bhattacharya P., Brion N., Elskens M., Fontijn K., Gao Y., Gevera P.K., Ijumulana J., Kisaka M., Leermakers M., Shemsanga C., Walraevens K., Wragg J., Kervyn M. Naturally occurring potentially toxic elements in groundwater from the volcanic landscape around Mount Meru, Arusha, Tanzania and their potential health hazard. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 807, P. 1, article 150487.
9. Sharma K., Janardhana Raju N., Singh N., Sreekesh S. Heavy metal pollution in groundwater of urban Delhi environs: Pollution indices and health risk assessment. *Urban Climate*, 2022, vol. 45, Article 101233.
10. Koroša A., Mali N. Control of organic contaminants in groundwater by passive sampling and multivariate statistical analysis. *Journal of Environmental Management*, 2022, vol. 318, no. 15, article 115440.
11. SanPiN 2.1.3684-21 *Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k soderzhaniyu territoriy gorodskikh i selskikh poseleniy, k vodnym ob'yektam, pit'evoy vode i pit'yevomu vodosnabzheniyu, atmosfernomu vozdukh, pochvam, zhilym pomeshcheniyam, ekspluatatsii proizvodstvennykh, obshchestvennykh pomeshcheniy, organizatsii i provedeniyu sanitarno-protivoepidemiologicheskikh (profilakticheskikh) meropriyatiy (s izmeneniyami na 26 iyunya 2021 goda)* [Sanitary and epidemiological requirements for the maintenance of the territories of urban and rural settlements, for water bodies, drinking water and drinking water supply, atmospheric air, soils, residential premises, operation of industrial, public premises, organization and implementation of sanitary and anti-epidemic (preventive) events (as amended on June 26, 2021)]. Moscow, State Duma of the Russian Federation Publ., 2021. 65 p.
12. GOST R 58573-2019. *Okhrana prirody. Gidrosfera. Kachestvo vody. Risk-orientirovanny kontrol* [Protection of nature. Hydrosphere. Water quality. Risk based control]. Moscow, Standartin-form Publ., 2010. 18 p.
13. *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum*. Geneva, World Health Organization, 2017. 631 p.
14. Perelman A.I. *Geokhimiya landshafta* [Landscape geochemistry]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1975. 342 p.
15. Grigoryev N. A. *Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory* [Distribution of chemical elements in the upper continental crust]. Yekaterinburg, Ural Branch of RAS, 2009. 383 p.
16. CP 33-101-2003. *Svod pravil po proyektirovaniyu i stroitelstvu. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of practice for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics], Moscow, Gosstroy of Russia, FSUE TsPP Publ., 2004. 73 p.
17. Zuzolo D., Cicchella D., Catani V., Giaccio L., Guagliardi I., Esposito L., De Vivo B. Assessment of potentially harmful elements pollution in the Calore River basin (Southern Italy). *Environmental Geochemistry and Health*, 2017, no. 39, pp. 531–548.
18. Babin G.A., Chernykh A.I., Golovina A.G., Zhigalov S.V., Dolgushin S.S., Vetrov E.V., Korableva T.V., Bodina N.A., Svetlova N.A., Fedoseev G.S., Khilko A.P., Epifanov V.A., Loskutov Yu.I., Loskutov I.Yu., Mikharevich M.V., Pikhutin E.A. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tret'ye pokolenie). Seriya Altaye-Sayanskaya. List N-44 – Novosibirsk. Obyasnitelnaya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Altai-Sayan series. Sheet N-44 – Novosibirsk. Explanatory letter]. St. Petersburg, Cartographic factory VSEGEI Publ., 2015. 392 p.
19. Novikov D.A., Sukhorukova A.F., Korneeva T.V., Kamenova-Totzeva R.M., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Hydrogeology and hydrogeochemistry of the «Kamenskoe» field of radon-rich waters (Novosibirsk). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 192–208. In Rus.
20. Novikov D.A., Dultsev F.F., Maksimova A.A., Pyryaev A.N., Fage A.N., Khvashchevskaya A.A., Derkachev A.S., Chernykh A.V. Initial results of the integrated isotope-hydrogeochemical studies of the Novobibeevo occurrence of radon-rich waters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 57–72. In Rus.
21. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Sukhorukova A.F., Vakulenko L.G., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Faguet A.N., Khvashchevskaya A.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Mel'gunov M.S., Kalinkin P.N., Rastigeev S.A. The Inskie Springs: New Insights into Low-Radon Waters. *Russian Geology and Geophysics*, 2022, vol. 63, no. 12, pp. 1424–1441.
22. Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Derkachev A.S., Sukhorukova A.F., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Khvashchevskaya A.A., Kalinkin P.N., Petrozhitsky A.V. Radon-rich waters of the Tulinka aquifers, Novosibirsk, Russia. *Groundwater for Sustainable Development*, 2023, vol. 20, pp. 1–11.

Received: 17 January 2023.

Reviewed: 5 February 2023.

#### Information about the authors

**Anastasia A. Maksimova**, engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; assistant, Novosibirsk State University.

**Anatoliy V. Chernykh**, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Dmitry A. Novikov**, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

**Fedor F. Dultsev**, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Anton S. Derkachev**, engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences.

**Anna F. Sukhorukova**, Cand. Sc., researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; associate professor, Novosibirsk State University.

**Alexey N. Nikitenkov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Albina A. Khvashchevskaya**, Cand. Sc., head of the scientific laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.311.238; 621.311.22

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВПРЫСКА ПАРА В КАМЕРУ СГОРАНИЯ ГАЗОПАРОВОЙ УСТАНОВКИ НА ЕЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Галашов Николай Никитович<sup>1</sup>,  
gal@tpu.ru

Туболев Александр Анатольевич<sup>1</sup>,  
Tubolev@tpu.ru

Минор Александр Анатольевич<sup>1</sup>,  
aam29061994@gmail.com

Болдушевский Евгений Сергеевич<sup>1</sup>,  
franky575@rambler.ru

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

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью совершенствования тепловых схем и оптимизацией параметров газопаровых установок с целью сокращения потребления при выработке электроэнергии такого энергоресурса, как природный газ, что также позволит сократить количество вредных выбросов в окружающую среду.

**Цель:** проведение по разработанной методике разностороннего параметрического анализа с выбором оптимальных параметров режимов работы предложенной тепловой схемы газопаровой установки для повышения ее энергоэффективности.

**Объекты:** газопаровые установки с отпуском электроэнергии на основе газовых турбин с впрыском пара в камеру сгорания.

**Методы:** численные методы исследования на основе материальных и энергетических балансов систем, а также элементов газопаровых установок.

**Результаты.** На основе расчета тепловой схемы газопаровой установки с выработкой электроэнергии проведено сравнение влияния на ее энергетические характеристики постоянной и переменной температуры впрыска пара в камеру сгорания газотурбинной установки. Определено, что температура впрыскиваемого пара в камеру сгорания существенно влияет на диапазон изменения параметров газопаровой установки. Повышение степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе камеры сгорания приводит к уменьшению диапазона изменения параметров по сравнению с работой газопаровой установки с постоянной температурой впрыскиваемого пара в камеру сгорания. При этом диапазон изменения температуры впрыскиваемого пара с ростом степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе камеры сгорания существенно уменьшается. Установлено, что увеличение температуры впрыскиваемого пара по сравнению с его постоянной температурой при одинаковой температуре газов на выходе камеры сгорания и минимальной степени сжатия в компрессоре для этой температуры повышает электрический КПД нетто от 1 % при температуре газов 1600 °С до 3 % при температуре газов 1100 °С.

### Ключевые слова:

Газотурбинная установка, газопаровая установка, камера сгорания, впрыск пара, продукты сгорания, степень сжатия в компрессоре, котел-утилизатор.

### Введение

Последние годы показали, что такие энергоресурсы, как нефть, природный газ и уголь, еще длительное время в XXI в. будут основой энергоснабжения как в России, так и в мире. При этом происходит быстрый рост их стоимости. Поэтому актуальна разработка высокоэффективных энергосберегающих технологий с обеспечением снижения расхода углеводородного органического топлива и вредных выбросов от его сжигания.

На современном этапе основным способом повышения эффективности сжигания органического топлива для выработки электроэнергии является комбинация циклов Брайтона и Ренкина.

На данный момент для генерации электроэнергии на тепловых электростанциях применяется схема с раздельной работой термодинамических циклов Брайтона и Ренкина [1, 2]. В этой схеме теплота от сжигания топлива в камере сгорания газотурбинного цикла Брайтона создает в газовой турбине мощность,

необходимую для привода воздушного компрессора и генератора электрического тока. Уходящие из газовой турбины высокотемпературные продукты сгорания в котле-утилизаторе позволяют получить перегретый пар для получения электрической мощности в паротурбинном цикле Ренкина. Достоинством этой схемы является то, что оба цикла хорошо технически освоены как по отдельности, так и в комбинированной установке. При этом электрический КПД мощных газотурбинных установок (ГТУ) фирм General Electric (США), Siemens (Германия), Mitsubishi (Япония) достиг 44 %, а комбинированных парогазовых установок (ПГУ) на их основе – 63–64 % [3]. Недостатком схемы является то, что требуется два типа турбин: газовая в цикле Брайтона и паровая в цикле Ренкина, что усложняет схему и эксплуатацию установки, т. к. циклы связаны и изменения режимов работы одного цикла требуют изменения режимов другого цикла.

Также возможна схема комбинированной газопаровой установки (ГПУ), в которой в камеру сгорания



(КС) впрыскивается вода или водяной пар, которые с продуктами сгорания топлива совершают работу в газопаровой турбине [4–14]. Достоинством этой схемы является то, что установка получается проще и дешевле по конструкции. Впрыск воды или пара в камеру сгорания позволяет: повысить мощность газовой турбины за счет увеличения теплоемкости и расхода парогазовой смеси продуктов сгорания, а также разгрузить воздушный компрессор в результате сокращения расхода воздуха на единицу сжигаемого топлива. Существенным достоинством этой схемы является то, что впрыск воды или пара в камеру сгорания позволяет существенно уменьшить выбросы оксидов азота  $\text{NO}_x$  и монооксида углерода  $\text{CO}$  [15–21], при этом процесс сгорания топлива обеспечивает нормативные выбросы при сжигании газа и жидкого топлива по сравнению с малоэмиссионными камерами сгорания. Главным недостатком этой схемы является потеря впрыскиваемого и образующегося при окислении водорода пара. При этом увеличивается потеря теплоты с уходящими газами и снижается КПД цикла, а также возрастает паровое и тепловое загрязнение окружающей среды. Для возмещения потери пара требуется подготовка чистой добавочной воды. Чтобы уменьшить потери пара и тепла с уходящими газами в этой схеме применяют котел-утилизатор с конденсационным теплоутилизатором на выходе, который используется для конденсации пара из парогазовой смеси продуктов сгорания [22–26].

Из проведенного анализа работ [15–21] по влиянию впрыска пара на образование оксидов азота  $\text{NO}_x$  и углерода  $\text{CO}$  следует, что оптимальный расход впрыскиваемого пара находится в пределах 1,5...2,5 кг пара/кг топлива, а оптимальный коэффициент избытка воздуха – 1,5...2,7. Для современных ГТУ характерна температура 1100...1600 °C на выходе из камеры сгорания, а экспериментальные КС работают при температуре 1700 °C. В ГПУ для работы в пределах оптимального коэффициента избытка воздуха и для получения необходимой температуры на выходе из камеры сгорания требуется расход впрыскиваемого в КС пара больше 2,5 кг пара/кг топлива, поэтому расход впрыскиваемого пара делят на две части: экологический впрыск в пределах оптимального для поддержания минимальных выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  и углерода  $\text{CO}$  вводят в зону горения топлива; энергетический впрыск для охлаждения КС и поддержания необходимой температуры на ее выходе вводят за зоной горения.

Данная работа является продолжением [27], в которой рассматривается модель расчета схемы газопаровой установки с впрыском водяного пара в камеру сгорания газотурбинной установки. Показано, что впрыск пара в камеру сгорания ГТУ и для охлаждения газовой турбины позволяет существенно снизить расход воздуха и коэффициент избытка воздуха в КС, что снижает мощность на сжатие в компрессоре, а также температуру горения топлива, а это уменьшает выбросы оксидов азота в окружающую среду. Смесь газов с высоким содержанием водяного пара позволя-

ет также примерно в два раза повысить удельную мощность газовой турбины. В работе [27] расчеты проводились при постоянной температуре впрыскиваемого пара 540 °C, в то время как в зависимости от степени сжатия в компрессоре и температуры продуктов сгорания за КС может быть достигнуто значение температуры пара на выходе котла-утилизатора до 800 °C и выше. Поэтому в данной работе рассматривается расчет схемы ГПУ с переменной температурой пара, впрыскиваемого в камеру сгорания газовой турбины, и влияние ее на энергетические характеристики газопаровой установки.

#### Расчетная схема газопаровой установки

Расчетная схема ГПУ приведена на рис. 1. Эта схема отличается от рассчитываемой в [27] тем, что в ней введен узел подогрева питательной воды, который подробно рассмотрен в работе [26]. Числовые значения на схеме показывают точки процессов на входе и выходе соответствующих элементов и используются в алгоритме и программе расчета схемы ГПУ. Элементы схемы и процессы в них подробно описаны в работах [26, 27].

На рис. 2 приведена  $T-Q$  диаграмма теплообмена в котле-утилизаторе. В данной работе зафиксированы разницы температур между продуктами сгорания и нагреваемой водой:  $\Delta t_{8-14}=10$  °C;  $\Delta t_{6-17}$  не ниже 40 °C;  $\Delta t_{9-12}$  не ниже 20 °C;  $\Delta t_{14-13}$  не ниже 5 °C.

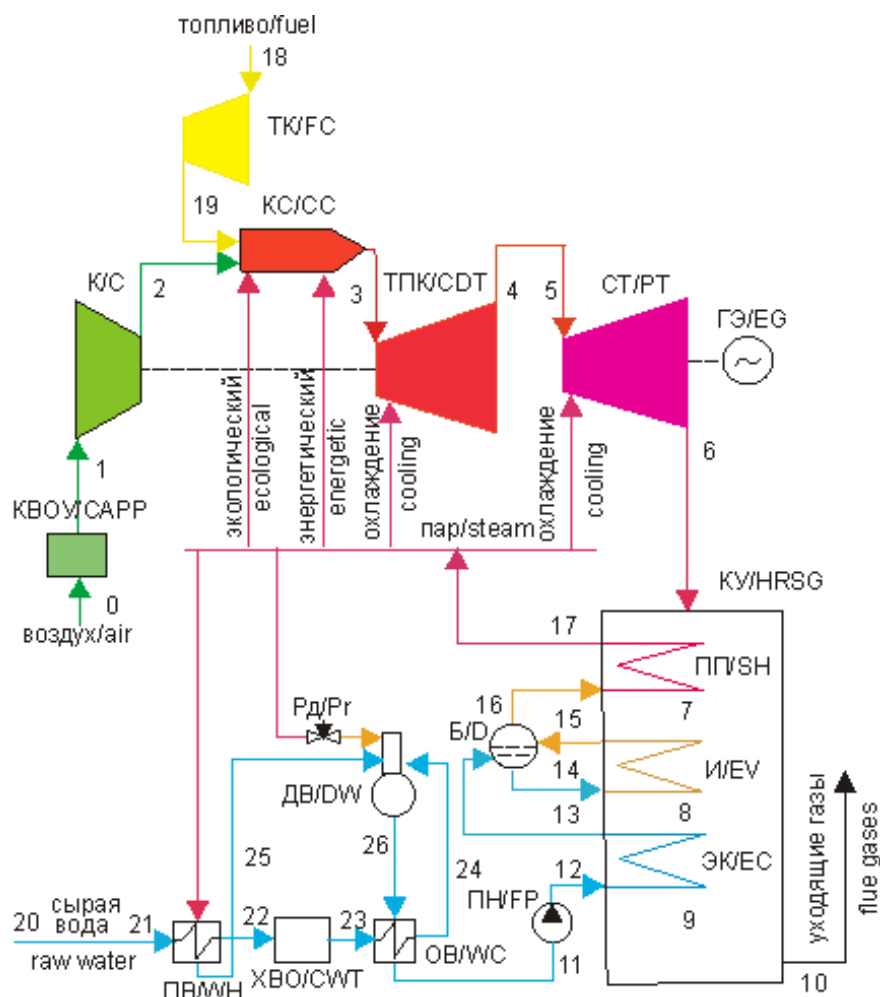
Методика расчета тепловой схемы газопаровой установки

Блок-схема алгоритма расчета схемы ГПУ приведена в работе [26]. С учетом включения в схему узла подпитки с деаэратором расчет схемы производится с помощью двух итерационных процессов. Во внутреннем итерационном процессе предварительно принимаются значения расхода пара на деаэратор и температуры питательной воды на входе в котел-утилизатор, а после их определения с заданной погрешностью во внешнем цикле определяются все расходы и параметры тепловой схемы. Расчеты производятся путем определения относительного энергетического расхода пара на впрыск, который с заданной погрешностью сводит все материальные и энергетические балансы элементов схемы ПГУ. Допустимый диапазон изменения параметров работы установки определяется входением разницы температур КУ (рис. 2) в допустимые пределы:  $\Delta t_{8-14}=10$  °C;  $\Delta t_{6-17}$  не ниже 40 °C;  $\Delta t_{9-12}$  не ниже 20 °C;  $\Delta t_{14-13}$  не ниже 5 °C. При расчете также учитывается условие, что температура уходящих газов из КУ должна быть выше температуры точки росы не менее чем на 10 °C.

*Исходные данные* (первые двенадцать пунктов повторены из работы [27]):

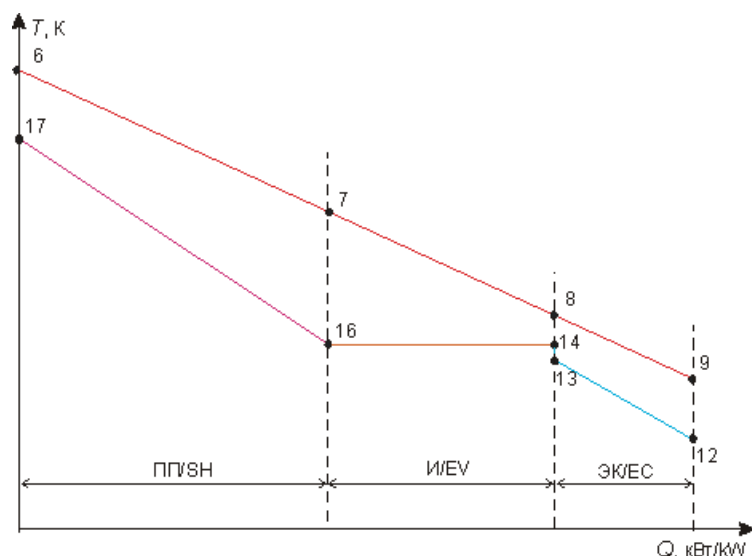
- 1) параметры наружного воздуха:  $P_{\text{нв}}$ ,  $t_{\text{нв}}$ , относительная влажность  $\phi_{\text{нв}}$ ;
- 2) состав природного газа:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$  и т. д.;
- 3) параметры природного газа:  $P_{\text{т}}$ ,  $t_{\text{т}}$ ;
- 4) относительные потери давления:  $\delta P_{\text{квоу}}$ ,  $\delta P_{\text{пн-ку}}$ ,  $\delta P_{\text{ку}}$ ,  $\delta P_{\text{ку.лс}}$ ,  $\delta P_{\text{к.вых}}$ ,  $\delta P_{\text{кс}}$ ,  $\delta P_{\text{тк-кс}}$ ,  $\delta P_{\text{тпк-ст}}$ ,  $\delta P_{\text{ку-впр}}$ ;





**Рис. 1.** Схема газопаровой установки: КВОУ – комплексная воздухоочистная установка; К – компрессор; КС – камера сгорания; ТК – топливный компрессор; ТПК – турбина привода компрессора; СТ – силовая турбина; КУ – котел-утилизатор; ПП – пароперегреватель; И – испаритель; Б – барабан; ЭК – экономайзер; ГЭ – генератор электрического тока; ХВО – химводоочистка; ПН – питательный насос; ДВ – деаэратор воды; Рд – регулятор давления; ОВ – охладитель воды; ПВ – подогреватель воды

**Fig. 1.** Cycle diagram of combined-cycle plant: CAPP – complete air purification plant; C – compressor; CC – combustion chamber; FC – fuel compressor; CDT – compressor drive turbine; PT – power turbine; HRSG – heat recovery steam generator; SH – superheater; EV – evaporator; D – drum; EC – economizer; EG – electric generator; CWT – chemical water treatment; FP – feed pump; DW – water deaerator; Pr – pressure regulator; WC – water cooler; WH – water heater



**Рис. 2.**  $T-Q$  диаграмма теплообмена в котле-утилизаторе: ПП – пароперегреватель; И – испаритель; ЭК – экономайзер. Номера точек на линиях соответствуют номерам на рис. 1

**Fig. 2.**  $T-Q$  diagram of heat transfer in the waste heat boiler: SH – superheater; EV – evaporator; EC – economizer. The numbers of points on the lines correspond to the numbers in Fig. 1

- 5) КПД:  $\eta_k$ ,  $\eta_{тк}$  – воздушного и топливного компрессора;  $\eta_{м.к}$ ,  $\eta_{м.тпк}$  – механический компрессора и ТПК;  $\eta_{тпк}$ ,  $\eta_{ст}$  – внутренний относительный ТПК и СТ;  $\eta_{эг}$ ,  $\eta_{эл}$  – электрогенератора и электропривода;  $\eta_{ск}$  – камеры сгорания;
- 6) степень сжатия компрессора  $\varepsilon_k$ ;
- 7) температура продуктов сгорания на выходе КС,  $t_3$ ;
- 8) давление  $P_{пв}$  и температура  $t_{пв}=t_{24}$ ;
- 9) относительный расход экологического пара на впрыск  $d_{эк}$ ;
- 10) относительный расход пара на охлаждение  $\delta_{охл}$  и его доля на ТПК  $K_{охл}$ ;
- 11) разности температур:  $\Delta t_{6-17}=30$ ,  $\Delta t_{8-14}=10$ ,  $\Delta t_{14-13}=5$ ,  $\Delta t_{9-12}=20$ ;
- 12) расход воздуха на входе в компрессор  $G_k$ .

Дальше дополнительно необходимо ввести:

- 13) приближенный относительный расход пара на деаэрактор  $d_d=0,005 \dots 0,001$ ;
- 14) приближенную температуру питательной воды на входе КУ  $t_{12}=60 \dots 70$  °С;
- 15) повышение температуры в насосе  $\Delta t_{нас}=0,1 \dots 0,2$  °С.

#### Результаты расчета и их анализ

Для расчета в программе были введены следующие исходные данные:

- 1) параметры наружного воздуха:  $P_{нв}=0,1013$  МПа,  $t_{нв}=15$  °С;  $\phi_{нв}=0,6$ ;
- 2) состав природного газа:  $CH_4=100$  %;
- 3) параметры природного газа:  $P_r=0,2$  МПа;  $t_r=5$  °С;
- 4) относительные потери давления:  $\delta P_{квоу}=0,01$ ,  $\delta P_{пн-ку}=\delta P_{ку}=\delta P_{ку,пс}=\delta P_{к.вых}=\delta P_{кк}=\delta P_{тк-кк}=\delta P_{тпк-ст}=0,03$ ,  $\delta P_{ку-охл}=0,05$ ;
- 5) КПД:  $\eta_k=0,86$ ,  $\eta_{тк}=0,9$ ,  $\eta_{мк}=0,995$ ,  $\eta_{кк}=0,995$ ,  $\eta_{м.тпк}=0,995$ ,  $\eta_{тпк}=0,9$ ,  $\eta_{ст}=0,93$ ,  $\eta_{эг}=0,982$ ,  $\eta_{эл}=0,99$ ,  $\eta_{пн}=0,8$ ;
- 6) степень сжатия компрессора:  $4 \dots 80$ ;
- 7) температура продуктов сгорания на выходе КС:  $1100 \dots 1700$  °С;
- 8) давление и температура добавочной воды:  $P_{дв}=0,2$  МПа,  $t_{дв}=10$  °С;
- 9) относительный расход экологического пара на впрыск  $d_{эк}=2$  кг/кг топлива;
- 10) относительный расход пара на охлаждение:  $\delta_{охл}=0,05$ ,  $K_{охл}=0,7$ ;
- 11) массовый расход воздуха на входе в компрессор  $G_k=1$  кг/с;
- 12) приближенный удельный расход пара на деаэрактор  $d_d=0,25$  кг/кг топлива;
- 13) приближенная температура питательной воды на входе КУ  $t_{12}=60$  °С;
- 14) повышение температуры в насосе  $\Delta t_{нас}=0,1$  °С;

Для определения влияния на параметры и показатели схемы ПГУ температуры впрыска пара в КС расчет проводился для двух случаев: при постоянной температуре пара 540 °С и при переменной температуре при условии,

что температура пара на выходе КУ ниже температуры выходящих из ГТ газов не менее чем на 40 °С.

Расчеты проводились при изменении степени сжатия компрессора от 4 до 80 и изменении температуры продуктов сгорания на выходе КС от 1100 до 1700 °С с шагом 100 °С. Нижний предел температуры выбран в соответствии с рис. 3, взятым в [27], который показывает, что впрыск пара в КС ГТУ эффективен только при температуре продуктов сгорания на выходе КС выше 900 °С, а существенный прирост КПД по отпуску электроэнергии может быть получен только при температуре выше 1100 °С.

Предварительные расчеты показали, что температура выходящих газов из ГТ позволяет получить перегретый пар с температурой на выходе КУ до 650...900 °С. В данной работе проведены расчеты с изменением температуры впрыскиваемого в КС ГТУ пара в пределах 525...800 °С.

Для наиболее важных показателей результаты расчетов приведены на рис. 4–8.

На рис. 4 видим, что максимальный диапазон изменения температуры впрыскиваемого пара от 525 до 780 °С может быть получен для температур газа на выходе КС 1100...1300 °С. С ростом этой температуры диапазон сужается, достигая 525...630 °С при температуре на выходе КС 1700 °С.

На рис. 5 приведена зависимость электрического КПД нетто ПГУ от степени сжатия в компрессоре, температуры газов на выходе КС и температуры впрыскиваемого пара в камеру сгорания ГТУ.

Анализ зависимостей электрического КПД нетто на рис. 5, а, б показывает, что увеличение температуры впрыскиваемого пара повышает КПД при уменьшении степени сжатия от 1 % при температуре газов 1600 °С до 3 % при температуре газов 1100 °С.

На рис. 6 приведена зависимость относительного расхода энергетического впрыска пара в кг на кг сжигаемого топлива от степени сжатия в компрессоре, температуры газов на выходе КС и температуры впрыскиваемого пара в камеру сгорания.

Сравнение зависимостей расхода впрыскиваемого пара при одинаковой степени сжатия в компрессоре и температуре газов на выходе КС на рис. 6, а, б показывает, что увеличение температуры впрыскиваемого пара при снижении степени сжатия уменьшает относительный расход впрыскиваемого пара от 3,3 до 2,8 кг на кг топлива при температуре газов на выходе КС 1700 °С и от 8,35 до 7,63 кг на кг топлива при температуре газов на выходе КС 1100 °С.

На рис. 7 приведена зависимость коэффициента избытка воздуха в КС ГТУ от степени сжатия в компрессоре, температуры газов на выходе КС и температуры впрыскиваемого пара в камеру сгорания.

Сравнение зависимостей коэффициента избытка воздуха в КС ГТУ при одинаковой степени сжатия в компрессоре и температуре газов на выходе КС на рис. 7, а, б показывает, что увеличение температуры впрыскиваемого пара при уменьшении степени сжатия повышает коэффициент избытка воздуха от 1,27 до 1,38 при температуре газов на выходе КС 1700 °С и от 1,8 до 2,1 при температуре газов на выходе КС 1100 °С.

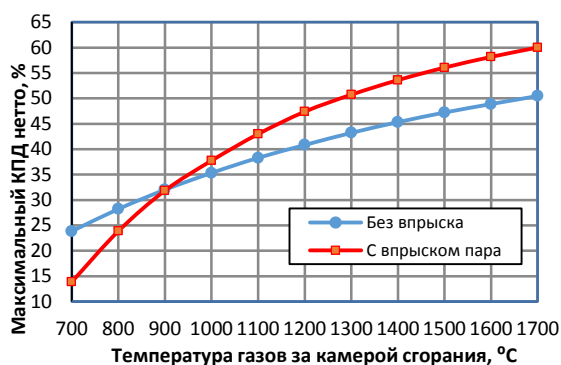


Рис. 3. Максимальный коэффициент полезного действия нетто в зависимости от температуры газов за камерой сгорания

Fig. 3. Maximum net efficiency depending on the gas temperature behind the combustion chamber

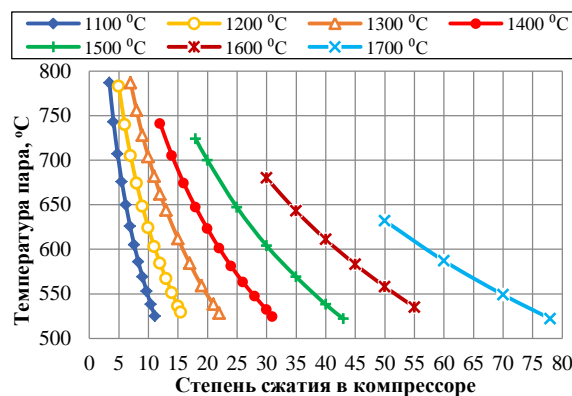
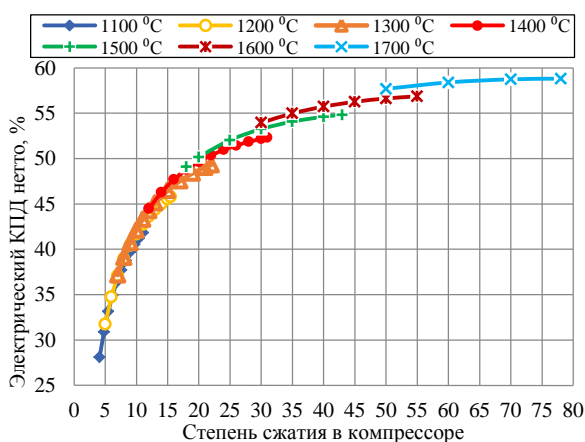


Рис. 4. Температура пара, впрыскиваемого в камеру сгорания газотурбинной установки

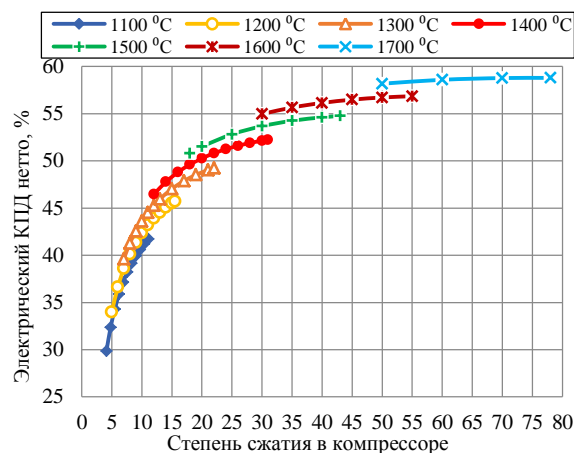
Fig. 4. Temperature of the steam injected into the combustion chamber of the gas turbine



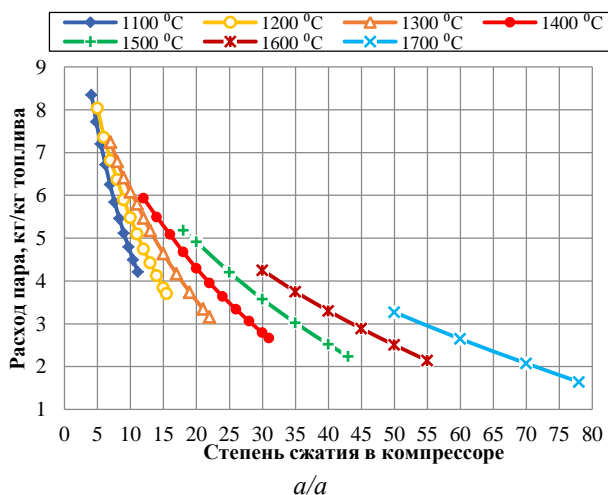
а/а

Рис. 5. Электрический коэффициент полезного действия нетто: а) температура пара 540 °C; б) переменная температура пара

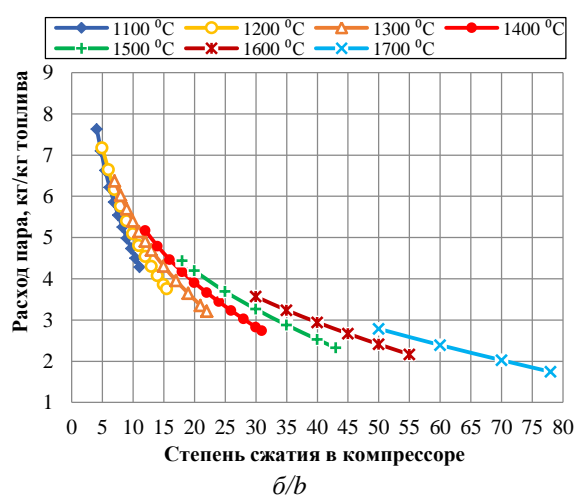
Fig. 5. Net electrical efficiency: а) steam temperature 540 °C; б) variable steam temperature



б/б



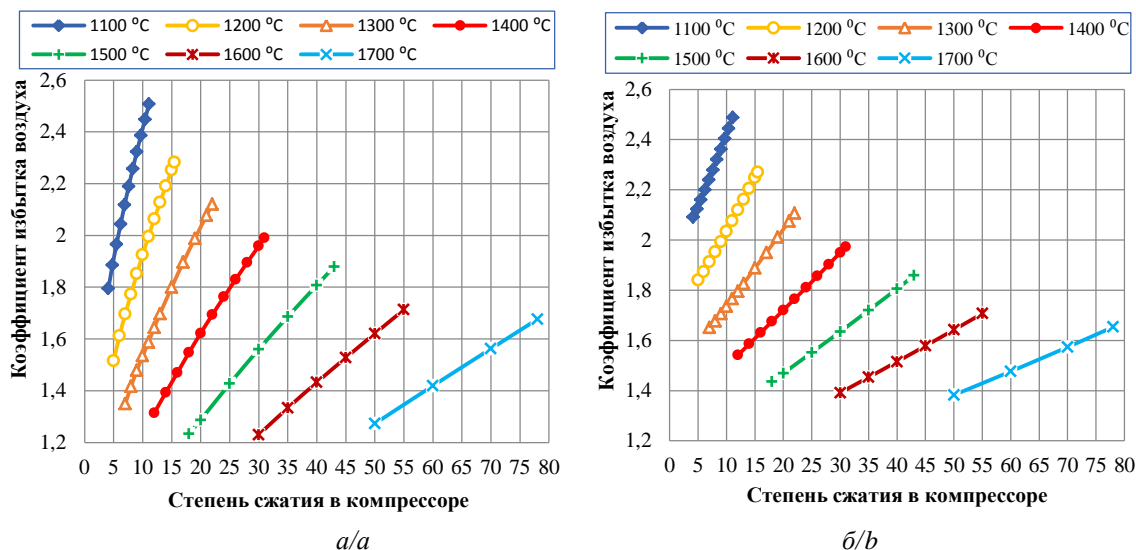
а/а



б/б

Рис. 6. Зависимость относительного расхода энергетического пара от степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе камеры сгорания: а) при температуре впрыскиваемого пара 540 °C; б) при переменной температуре впрыскиваемого пара

Fig. 6. Dependence of the relative consumption of power steam on the degree of compression in the compressor and the temperature of the gases at the outlet of the combustion chamber: а) at injected steam temperature of 540 °C; б) at variable temperature of injected steam



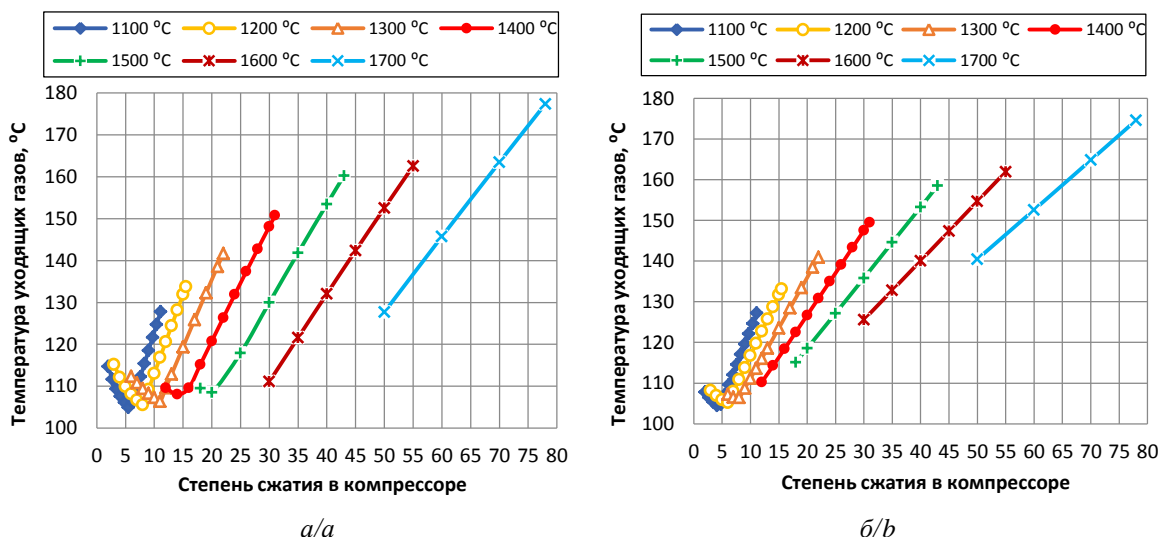
**Рис. 7.** Зависимость коэффициента избытка воздуха от степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе камеры сгорания: а) при температуре впрыскиваемого пара 540 °С; б) при переменной температуре впрыскиваемого пара

**Fig. 7.** Dependence of the excess air coefficient on the degree of compression in the compressor and the temperature of the gases at the outlet of the combustion chamber: а) at injected steam temperature of 540 °С; б) at variable temperature of injected steam

На рис. 8 приведена зависимость температуры уходящих газов от степени сжатия в компрессоре, температуры газов на выходе КС и температуры впрыскиваемого пара в камеру сгорания.

Сравнение зависимостей температуры уходящих газов при одинаковой степени сжатия в компрессоре и температуре газов на выходе КС на рис. 8, а, б показывает, что увеличение температуры впрыскиваемого пара при уменьшении степени сжатия приводит

к повышению температуры уходящих газов: от 128 до 140 °С при степени сжатия 50 и температуре газов на выходе КС 1700 °С; от 90 до 118 °С при степени сжатия 20 и при температуре газов на выходе КС 1500 °С. При более низких температурах газов на выходе КС интенсивность увеличения температуры впрыскиваемого пара при уменьшении степени сжатия температура уходящих газов замедляется.



**Рис. 8.** Зависимость температуры уходящих газов от степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе камеры сгорания: а) при температуре впрыскиваемого пара 540 °С; б) при переменной температуре впрыскиваемого пара

**Fig. 8.** Dependence of flue gas temperature on the degree of compression in the compressor and gas temperature at the outlet of the combustion chamber: а) at injected steam temperature of 540 °С; б) at variable temperature of injected steam

#### Предложения по направлению дальнейших исследований

Проведенные расчеты показали, что в ГПУ с впрыском пара в КС ГТУ при температуре парогазовой смеси на выходе КС 1500 °С можно получить электрический КПД нетто до 55 %, а при температуре 1700 °С до 58 %. Эти результаты получены при температуре уходящих газов из КУ выше температуры точки росы на 10 °С. При этом, как видно на рис. 8, температура уходящих газов из КУ достигает 130...175 °С, особенно при высокой температуре парогазовой смеси на выходе КС, когда получаем высокий КПД. Высокая температура уходящих газов приводит к большой потере теплоты в цикле ГПУ, а также, как показано во введении, к потере впрыскиваемого и получаемого при окислении водорода топлива пара, что требует повышенных затрат на водоподготовку и ведет к тепловому и паровому загрязнению атмосферы. Для устранения этой проблемы необходимо на выходе парогазовой смеси из КУ установить конденсационный теплоутилизатор, который позволит понизить температуру уходящих газов до 40...50 °С и сконденсировать из них большую часть влаги. Можно использовать различные способы утилизации теплоты. Например, как показано в [26], использовать теплоту в системе теплоснабжения, что позволило получить коэффициент использования теплоты топлива до 110 % при расчете по низшей удельной теплоте топлива, но при этом происходит на 1...2 % снижение электрического КПД нетто. Также можно, как показано в [28], использовать теплоту КУ и теплоутилизатора в дополнительном Органическом цикле Ренкина с воздушным конденсатором, особенно в северных регионах с низкой температурой наружного воздуха, что позволит повысить электрический КПД нетто ГПУ на несколько процентов.

#### Выводы

1. Проведенный анализ показал, что:

- степень сжатия в компрессоре и температура газов на выходе камеры сгорания оказывают значительное влияние на показатели работы газопаровой установки;
- температура впрыскиваемого пара в камеру сгорания существенно влияет на диапазон изменения параметров газопаровой установки, при повышении степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе камеры сгорания диапазон изменения параметров сокращается по сравнению с работой газопаровой

установки при постоянной температуре впрыскиваемого пара в камеру сгорания;

- диапазон изменения температуры впрыскиваемого пара с ростом степени сжатия в компрессоре и температуры газов на выходе камеры сгорания существенно уменьшается;
  - увеличение температуры впрыскиваемого пара при одинаковой температуре газов на выходе камеры сгорания и минимальной степени сжатия в компрессоре для этой температуры приводит к повышению электрического коэффициента полезного действия нетто от 1 % при температуре газов 1600 °С до 3 % при температуре газов 1100 °С по сравнению с постоянной температурой впрыскиваемого пара;
  - увеличение температуры впрыскиваемого пара при уменьшении степени сжатия снижает относительный расход впрыскиваемого энергетического пара от 3,3 до 2,8 кг на кг топлива при температуре газов на выходе камеры сгорания 1700 °С и от 8,35 до 7,63 кг на кг топлива при температуре газов на выходе камеры сгорания 1100 °С по сравнению с постоянной температурой впрыскиваемого пара;
  - увеличение температуры впрыскиваемого пара при уменьшении степени сжатия приводит к повышению коэффициента избытка воздуха от 1,27 до 1,38 при температуре газов на выходе камеры сгорания 1700 °С и от 1,8 до 2,1 при температуре газов на выходе камеры сгорания 1100 °С по сравнению с постоянной температурой впрыскиваемого пара;
  - увеличение температуры впрыскиваемого пара при уменьшении степени сжатия повышает температуру уходящих газов от 128 до 140 °С при степени сжатия 50 и температуре газов на выходе камеры сгорания 1700 °С и от 90 до 118 °С при степени сжатия 20 и при температуре газов на выходе камеры сгорания 1500 °С.
2. Проведенные исследования показывают, что увеличение температуры впрыскиваемого пара дает более значимый эффект при низкой степени сжатия в компрессоре и температуре газов на выходе камеры сгорания.
3. Повысить эффективность рассматриваемой схемы газопаровой установки можно установкой конденсационного теплоутилизатора на выходе котла-утилизатора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цанев С.В., Бузов В.Д., Ремизов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций. – М.: Изд-во МЭИ, 2013. – 648 с.
2. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций. – М.: ИД МЭИ, 2002. – 584 с.
3. Ольховский Г.Г. Наиболее мощные энергетические ГТУ (обзор) // Теплоэнергетика. – 2021. – № 6. – С. 87–93.
4. Зысин В.А. Комбинированные и парогазовые установки и циклы. – М.: Л.: ГЭИ, 1962. – 186 с.
5. Арсеньев Л.В., Тырышкин В.Г. Комбинированные установки с газовыми турбинами. – Л.: Машиностроение, 1982. – 247 с.
6. Манушин Э.А. Комбинированные энергетические установки с паровыми и газовыми турбинами. – М.: ВИНТИ, 1990. – 184 с.
7. Колп Д.А., Меллер Д.Ж. Ввод в эксплуатацию первой в мире газотурбинной установки полного цикла STIG на базе газогенератора LM 5000 (фирма Simpson Paper Company) // Современное машиностроение. Сер. А. – 1989. – № 11. – С. 1–14.
8. Влияние расхода охлаждающего пара на характеристики парогазовых установок с впрыском пара / В.Е. Беляев, Д.В. Листопадов, А.С. Косой, А.П. Маркелов, М.В. Синкевич // Теплоэнергетика. – 2002. – № 9. – С. 47–51.

9. Influence of water injection on performance of scramjet engine / Yuefei Xiong, Jiang Qin, Kunlin Cheng, Youyin Wang // *Energy*. – 2020. – V. 201. – P. 117477–117490.
10. Efficiency boosting and steam saving for a steam-injected gas turbine engine: optimization study of the running conditions / A.M. Abubaker, A. Darwish Ahmad, M.N.A. Magableh, Y.S.H. Najjar // *Journal of Energy Engineering – ASCE*. – 2021. – V. 147 (1). – P. 732–748.
11. Techno-economic comparison of combined cycle gas turbines with advanced membrane configuration and MEA solvent at part load conditions / M. van Der Spek, D. Bonalumi, G. Manzolini, A. Ramirez, A.P.C. Faaij // *Energy and Fuels*. – 2018. – V. 32 (1). – P. 625–645.
12. Steam injected Humphrey cycle for gas turbines with pressure gain combustion / P. Stathopoulos, T. Rähse, J. Vinkeloe, N. Djordjevic // *Energy*. – 2019. – V. 188. – P. 116020.
13. On energy, exergy, and environmental aspects of a combined gas-steam cycle for heat and power generation undergoing a process of retrofitting by steam injection / P. Ziolkowski, T. Kowalczyk, M. Lemański, J. Badur // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – V. 192. – P. 374–384.
14. Chmielewski M., Niszczota P., Gieras M. Combustion efficiency of fuel-water emulsion in a small gas turbine // *Energy*. – 2020. – V. 211. – P. 118961–118985.
15. Иванов А.А., Ермаков А.Н., Шляхов Р.А. О глубоком подавлении выбросов NOx и CO в ГТУ с впрыском воды или пара // *Известия РАН. Энергетика*. – 2010. – № 3. – С. 119–128.
16. Гордин К.А., Масленников В.М., Филимонова Е.А. Оценка уровня эмиссии оксидов азота при подаче пара с природным газом в камеру сгорания газотурбинной установки // *Теплофизика высоких температур*. – 2013. – Т. 51. – № 6. – С. 937–944.
17. Даденко В.В., Зейгарник Ю.А., Косой А.С. Опыт использования воды и водяного пара для обеспечения экологических норм в конверсионных газотурбинных двигателях // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 4. – С. 49–56.
18. Проблема и пути создания малотоксичных камер сгорания для перспективных стационарных ГТУ / А.Г. Тумановский, М.Н. Гутник, В.Д. Васильев, Л.В. Булысова, М.М. Гутник // *Теплоэнергетика*. – 2006. – № 7. – С. 22–29.
19. Generation characteristics of thermal NOx in a double-swirler annular combustor under various inlet conditions / Zaiguo Fu, Huanhuan Gao, Zhuoxiong Zeng, Jiang Liu, Qunzhi Zhu // *Energy*. – 2020. – V. 200. – P. 117487–117501.
20. Экспериментальные исследования эмиссии NOx при последовательном сжигании топлива с диффузионной второй зоной / Л.А. Булысова, В.Д. Васильев, М.Н. Гутник, А.Л. Берне // *Теплоэнергетика*. – 2019. – № 6. – С. 33–40.
21. Farokhipour A., Hamidpour E., Amani E. A numerical study of NOx reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers // *Fuel*. – 2018. – V. 212. – P. 173–186.
22. Efficiency of utilization of heat of moisture from exhaust gases of heat HRSG of CCGT / N. Galashov, S. Tsubulskiy, D. Melnikov, A. Kiselev, A. Gabdullina // *MATEC Web of Conferences*. – Tomsk, 2017. – P. 01027–01031.
23. Mokhtari H., Ahmadsedigh H., Ameri M. The optimal design and 4E analysis of double pressure HRSG utilizing steam injection for Damavand power plant // *Energy*. – 2017. – V. 118. – P. 399–413.
24. Numerical and experimental investigation of flue gases heat recovery via condensing heat exchanger / A. Macháčková, R. Kocich, M. Bojko, L. Kunc'ická, K. Polko // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2018. – V. 124. – P. 1321–1333.
25. Парогазовая установка для комбинированной выработки электроэнергии, тепла и холода (тригенерация) / В.М. Батенин, В.М. Масленников, Ю.А. Выскубенко, Э.А. Цалко, В.Я. Штеренберг // *Теплофизика высоких температур*. – 2014. – Т. 14. – № 6. – С. 934–940.
26. Расчет параметров схемы газопаровой установки с глубокой утилизацией и отпуском теплоты / Н.Н. Галашов, А.А. Туболев, В.В. Беспалов, А.А. Минор, Е.С. Болдушевский // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 43–55.
27. Параметрический анализ схемы газопаровой установки с помощью математической модели / Н.Н. Галашов, А.А. Туболев, А.А. Минор, А.И. Баннова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 124–135.
28. Галашов Н.Н., Цибульский С.А. Параметрический анализ схемы парогазовой установки с комбинацией трех циклов для повышения КПД при работе в северных газодобывающих районах // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 44–55.

Поступила: 12.01.2023 г.

Прошла рецензирование 02.02.2023 г.

#### Информация об авторах

**Галашов Н.Н.**, кандидат технических наук, доцент НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Туболев А.А.**, старший преподаватель НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Минор А.А.**, аспирант НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Болдушевский Е.С.**, аспирант НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.311.238; 621.311.22

## INFLUENCE OF THE TEMPERATURE OF STEAM INJECTION INTO THE COMBUSTION CHAMBER OF A GAS-STEAM PLANT ON ITS ENERGY CHARACTERISTICS

Nikolay N. Galashov<sup>1</sup>,  
gal@tpu.ru

Alexander A. Tubolev<sup>1</sup>,  
Tubolev@tpu.ru

Alexander A. Minor<sup>1</sup>,  
aam29061994@gmail.com

Evgeny S. Boldushevsky<sup>1</sup>,  
franky575@rambler.ru

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

**The relevance** the work is caused by the need to improve thermal schemes and optimization of the parameters of gas-steam plants for reducing the consumption of such an energy resource as natural gas in electricity generation, which will also reduce the amount of harmful emissions into the environment.

**Purpose:** to carry out, according to the developed methodology, a versatile parametric analysis with the choice of the optimal parameters of the operating modes of the proposed thermal schemes of gas-steam plants to improve their energy efficiency.

**Objects:** gas-steam plants with the release of electricity based on gas turbines with steam injection into the combustion chamber.

**Methods:** numerical methods of research based on material and energy balances of systems, as well as elements of gas-steam plants.

**Results.** Based on the calculation of the thermal scheme of a gas-steam plant with electricity generation, the authors compared the effect on its energy characteristics of a constant and variable temperature of steam injection into the combustion chamber of a gas turbine plant. It was determined that the temperature of the injected steam into the combustion chamber significantly affects the range of parameters of the gas-steam plant. Increasing the compression ratio in the compressor and the temperature of the gases at the outlet of the combustion chamber lead to decrease in the range of parameters in comparison with the operation of a gas-steam plant with a constant temperature of the injected steam into the combustion chamber. In this case, the range of change in the temperature of the injected vapor with an increase in the degree of compression in the compressor and the temperature of the gases at the outlet of the combustion chamber is significantly reduced. It was established that the growth in the temperature of the injected steam compared to its constant temperature at the same gas temperature at the outlet of the combustion chamber and the minimum compression ratio in the compressor for this temperature increases the net electrical efficiency from 1 % at gas temperature of 1600 °C to 3 % at gas temperature of 1100 °C.

### Key words:

Gas turbine plant, gas-steam plant, combustion chamber, steam injection, combustion products, compression ratio in the compressor, waste heat boiler.

### REFERENCES

1. Tsanev S.V., Burov V.D., Remizov A.N. *Gazoturbinnye i parogazovye ustanovki teplovykh elektrostansiy* [Gas turbine and combined-cycle plants of thermal power plants]. Moscow, MEI Publ., 2013. 648 p.
2. Trukhniy A.D. *Parogazovye ustanovki elektrostansii* [Combined-cycle plants of a power plant]. Moscow, MEI Publ., 2002. 584 p.
3. Olkhovskiy G.G. Naibolee moshchnye energeticheskiye GTU (obzor) [The most powerful power gas turbines (review)]. *Teploenergetika*, 2021, vol. 6, pp. 87–93.
4. Zysin V.A. *Kombinirovannye i parogazovye ustanovki i tsikly* [Combined and combined-cycle gas installations and cycles]. Moscow, Leningrad, GEI Publ., 1962. 186 p.
5. Arsenyev L.V., Tyryshkin V.G. *Kombinirovannye ustanovki s gazovymi turbinami* [Combined installations with gas turbines]. St-Petersburg, Mashinostroenie Publ., 1982. 247 p.
6. Manushin E.A. *Kombinirovannye energeticheskie ustanovki s parovymi i gazovymi turbinami* [Combined power plants with steam and gas turbines]. Moscow, VINITI Publ., 1990. 184 p.
7. Kolp D.A., Meller D.Zh. Vvod v ekspluatatsiyu pervoy v mire gazoturbinnoy ustanovki polnogo tsikla STIG na baze gazogeneratora LM 5000 (firma Simpson Paper Company) [Commissioning of the world's first full-cycle gas turbine STIG based on the LM 5000 gas generator (Simpson Paper Company)]. *Sovremennoe mashinostroyeniye. Seriya: A*, 1989, no. 11, pp. 1–14.
8. Belyaev V.E., Listopadov D.V., Kosoy A.S., Markelov A.P., Senkevich M.V. Influence of cooling steam consumption on the characteristics of steam-gas installations with steam injection. *Teploenergetika*, 2002, no. 9, pp. 47–51. In Rus.
9. Yuefei Xiong, Jiang Qin, Kunlin Cheng, Youyin Wang. Influence of water injection on performance of scramjet engine. *Energy*, 2020, vol. 201, pp. 117477–117490.
10. Abubaker A.M., Darwish Ahmad A., Magableh M.N.A., Najjar Y.S.H. Efficiency boosting and steam saving for a steam-injected gas turbine engine: optimization study of the running conditions. *Journal of Energy Engineering – ASCE*, 2021, vol. 147 (1), pp. 732–748.
11. Van Der Spek M., Bonalumi D., Manzolini G., Ramirez A., Faaij A.P.C. Techno-economic comparison of combined cycle gas turbines with advanced membrane configuration and MEA solvent at part load conditions. *Energy and Fuels*, 2018, vol. 32 (1), pp. 625–645.
12. Stathopoulos P., Rähse T., Vinkeloe J., Djordjevic N. Steam injected Humphrey cycle for gas turbines with pressure gain combustion. *Energy*, 2019, vol. 188, p. 116020.
13. Ziolkowski P., Kowalczyk T., Lemanski M., Badur J. On energy, exergy, and environmental aspects of a combined gas-steam cycle for heat and power generation undergoing a process of retrofitting by steam injection. *Energy Conversion with Control and Management*, 2019, vol. 192, pp. 374–384.
14. Chmielewski M., Niszczota P., Gieras M. Combustion efficiency of fuel-water emulsion in a small gas turbine. *Energy*, 2020, vol. 211, pp. 118961–118985.

15. Ivanov A.A., Ermakov A.N., Shlyakhov R.A. O glubokom podavlenii vybrosov NOx i CO v GTU s vpryskom vody ili para [On the deep suppression of NOx and CO emissions in gas turbines with water or steam injection]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2010, vol. 3, pp. 119–128.
16. Gordin K.A., Maslennikov V.M., Filimonova E.A. Assessment of the emission level of nitrogen oxides when steam with natural gas is supplied to the combustion chamber of a gas turbine installation. *Thermophysics of high temperatures*, 2013, vol. 51, no. 6, pp. 937–944. In Rus.
17. Datsenko V.V., Zeygarnik Yu.A., Kosoy A.S. Opyt ispolzovaniya vody i vodyanogo para dlya obespecheniya ekologicheskikh norm v konversionnykh gazoturbinnnykh dvigatelyakh [Experience in the use of water and steam to ensure environmental standards in conversion gas turbine engines]. *Teploenergetika*, 2014, vol. 4, pp. 49–56.
18. Tumanovskiy A.G., Gutnik M.N., Vasilyev V.D., Bulysova L.V., Gutnik M.M. Problema i puti sozdaniya malotoksichnykh kamer sgoraniya dlya perspektivnykh statsionarnykh GTU [The problem and ways of creating low-toxic combustion chambers for promising stationary gas turbines]. *Teploenergetika*, 2006, vol. 7, pp. 22–29.
19. Zaiguo Fu, Huanhuan Gao, Zhuoxiong Zeng, Jiang Liu, Qunzhi Zhu. Generation characteristics of thermal NOx in a double-swirler annular combustor under various inlet conditions. *Energy*, 2020, vol. 200, pp. 117487–117501.
20. Bulysova L.A., Vasilyev V.D., Gutnik M.N., Berne A.L. Eksperimentalnye issledovaniya emissii NOx pri posledovatel'nom szhiganiy topliva s diffuzionnoy vtoroy zonoy [Experimental studies of NOx emission during sequential combustion of fuel with a diffusion second zone]. *Teploenergetika*, 2019, vol. 6, pp. 33–40.
21. Farokhipour A., Hamidpour E., Amani E. A numerical study of NOx reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers. *Fuel*, 2018, vol. 212, pp. 173–186.
22. Galashov N., Tsibulskiy S., Melnikov D., Kiselev A., Gabdullina A. Efficiency of utilization of heat of moisture from exhaust gases of heat HRSG of CCGT. *MATEC Web of Conferences*. Tomsk, 2017. pp. 01027–01031.
23. Mokhtari H., Ahmadisedigh H., Ameri M. The optimal design and 4E analysis of double pressure HRSG utilizing steam injection for Damavand power. *Energy*, 2017, vol. 118, pp. 399–413.
24. Machác'ková A., Kocich R., Bojko M., Kunc'ická L., Polko K. Numerical and experimental investigation of flue gases heat recovery via condensing heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 124, pp. 1321–1333.
25. Batenin V.M., Maslennikov V.M., Vyskubenko Yu.A., Tsalko E.A., Shterenberg V.Ya. Combined cycle gas plant for combined power generation, heat and cold (trigeneration). *Thermophysics of high temperatures*, 2014, vol. 14, no. 6, pp. 934–940. In Rus.
26. Galashov N.N., Tupolev A.A., Bepalov V.V., Minor A.A., Boldushevskiy E.S. Calculation of the parameters of the scheme of a gas-steam plant with deep utilization and heat release. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 124–135. In Rus.
27. Galashov N.N., Tupolev A.A., Minor A.A., Bannova A.I. Parametric analysis of the gas-steam installation scheme using a mathematical model. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 124–135. In Rus.
28. Galashov N.N., Tsibulskiy S.A. Parametric analysis of the diagram of the combined cycle gas turbine with a combination of three cycles for improving efficiency when operating in northern gas producing areas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 5, pp. 44–55. In Rus.

Received: 12 January 2023.

Reviewed: 2 February 2023.

#### Information about the authors

**Nikolay N. Galashov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander A. Tubolev**, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Alexander A. Minor**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Evgeny S. Boldushevsky**, postgraduate, National Research Tomsk Polytechnic University.



УДК 339.13:669.273.3:669.273.6

## ОБЗОР МИРОВОГО РЫНКА ВОЛЬФРАМА. ЧАСТЬ 2. ТОВАРНЫЕ ПОТОКИ СЫРЬЕВЫХ ВОЛЬФРАМОВЫХ ПРОДУКТОВ

Боярко Григорий Юрьевич,  
gub@tpu.ru

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

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью изучения проблем весьма изменчивого мирового рынка сырьевых вольфрамовых продуктов.

**Цель:** изучение динамики мировых товарных потоков (производства, импорта, экспорта, потребления) сырьевых вольфрамовых продуктов (вольфрамовых руд и концентратов, паравольфрамата аммония, вольфрамовых отходов и скрапа); оценка критичности мирового рынка сырьевых вольфрамовых продуктов.

**Методы:** статистический, графический, логический.

**Результаты.** Мировой рынок сырьевых вольфрамовых продуктов очень сложный. Мировая добыча первичного вольфрамового сырья выросла с 4–7 тыс. т 100 % W/год в 1913–1915 гг. до 75–90 тыс. т 100 % W/год в 2011–2020 гг. с темпом прироста +2,9 %/год. Утилизация вторичного вольфрамового сырья в целом по миру выросла с 2–3 тыс. т 100 % W/год в 1970-е гг. до 14–23 тыс. т 100 % W/год в 2008–2020 гг. с темпом прироста +4,3 %/год. Доля мировой утилизации вольфрамовых отходов от суммы первичного и вторичного вольфрамового сырья увеличилась с 5–6 % в 1970-е гг. до 21 % в 2019 г. В 1970–1980-е гг. был период обычного состояния медленно растущего мирового потребления сырьевых вольфрамовых продуктов с темпами прироста спроса на вольфрамовое сырье +3,4 %/год; в 1990-е гг. – значительное сокращение спроса на вольфрамовые продукты (–6,9 %/год) в военной сфере (завершение холодной войны) и смена приоритетов товаров в торговле вольфрамовым сырьем (увеличение роли торговли паравольфрамата аммония), сокращения роли России на вольфрамовом рынке (последствия стагнации российской экономики, в первую очередь, металлообработки); в 2000–2010-е гг. – бурный рост мирового спроса конечных вольфрамовых товарных продуктов и, соответственно, мирового спроса и предложения вольфрамового сырья с приростом спроса +6,4 %/год. При этом имеется тренд сокращения долей мировой торговли вольфрамовым сырьем от суммы добытого первичного и утилизированного вторичного сырья по объемам и стоимости, соответственно, с 39 и 47 % в 1970 г. до 21 и 27 % в 2020 г. Доля сырья в мировой торговле вольфрамовых продуктов сократилась с 70–80 % по объемам и 60–70 % по стоимости в 1970–1980-е гг., соответственно, до 42–55 и 15–20 % в 2010-е гг. Китай доминирует в мировом производстве, переработке и потреблении сырьевых вольфрамовых продуктов, поэтому его торговая политика по сдерживанию (квотированию) экспорта этих товаров и определяет динамику мирового рынка вольфрамового сырья. В международной торговле Китай изменил стратегию экспорта сырья на его импорт, став при этом лидером импортирования вольфрамовых концентратов. Другие промышленно развитые страны – потребители вольфрамового сырья – США, Германия, Британия, Франция, Япония и Южная Корея – стали критически зависимыми от импорта вольфрамовых сырьевых продуктов (доля импорта свыше 50 % от потребления) и будут продолжать оставаться таковыми в обозримом будущем.

### Ключевые слова:

Вольфрамовые руды и концентраты, паравольфрамаат аммония, вольфрамовые отходы, производство, экспорт, импорт, потребление, ценообразование, стоимость.

### Введение

Мировое предложение вольфрамового сырья, несмотря на достаточно большие объемы производства (до 90 тыс. т/год первичного предложения и до 20 тыс. т/год вторичного выпуска при переработке отходов), отличается сложностью рыночных отношений, что обусловлено доминированием предложения сырья из одной страны (Китая) и значительными динамическими изменениями объемов спроса и предложения вольфрамовых продуктов в последние 50 лет [1–4]. В 1990-е гг. произошло резкое сокращение спроса на вольфрамовые продукты в военной сфере, сменились приоритеты товаров в торговле вольфрамовым сырьем, сократилась роль России на вольфрамовом рынке на фоне стагнации российской экономики [1]. В 2000–2010-е гг. произошел бурный рост спроса и предложения вольфрамовых товарных продуктов ввиду экспоненциального наращивания возможностей китайской промышленности и это сопровождалось динамическими изменениями мирового рынка и

сырьевых вольфрамовых продуктов [5, 6]. Развивается и увеличивает объемы предложения и рынок вторичного вольфрамового сырья [7–9]. Требуется оценить состояние мировой минерально-сырьевой базы вольфрама, произвести анализ динамики мирового рынка множественности товарных сырьевых вольфрамовых продуктов (вольфрамовых руд и концентратов, паравольфрамата аммония, вольфрамовых отходов и скрапа) и определить уровень критичности сырьевых вольфрамовых товаров с позиции спроса и предложения.

### Методы исследования

С целью изучения мирового рынка сырьевых вольфрамовых продуктов были обработаны данные по их мировому производству, экспорту и импорту (в метрических тоннах) за период наиболее полных данных – 1970–2020 гг., а также по динамике мировых цен на эти продукты (в USD за метрическую тонну). Для показателей объемов производства, импорта и экспорта за базовый вариант брались данные Бри-

танской геологической службы (BGS) [10], имеющиеся для всего изучаемого периода. Они сравнивались с данными Геологической службы США (USGS) [11], маркетинговых компании TrendEconomy [12] и ИнфоМайн [13], информационной службы ООН (UN) [14], а также другими национальными источниками, включая доклады Федерального агентства недропользования [15] и Федеральной таможенной службы [16] России. При наличии различий с данными BGS в своде данных выставлялись сведения национальных источников или данные, присутствующие минимум в двух источниках (TrendEconomy, UN, USGS или ИнфоМайн). Объемы отходов вольфрама при отсутствии прямой информации оценивались по косвенным данным – по разности объемов производства конечных продуктов и их потребления с пересчетом на 50 % содержания W в отходах. Нетто-потребление сырьевых вольфрамовых продуктов рассчитывалось по сведению баланса «Производство» + «Импорт» – «Экспорт» = «Нетто-потребление».

#### Товарные потоки сырьевых вольфрамовых продуктов

Вольфрамовые продукты разделяются на группы сырьевых (первичных и вторичных) и конечных то-

варных продуктов. Объемы потоков товаров предпочтительно оценивать в метрических тоннах, как, впрочем, и цены на них за весовые тонну или килограмм.

Первичные сырьевые вольфрамовые продукты включают собственно исходные вольфрамовые руды и концентраты, а также промежуточный продукт – паравольфрамат аммония.

Вольфрамовые руды и концентраты (вольфрамита, шеелита и вольфрамсодержащих шламов) являются продуктами разработки собственно вольфрамовых и комплексных вольфрам-молибденовых и олово-вольфрамовых месторождений. Получение товарных вольфрамовых концентратов производится с использованием гравитационного и флотационного обогащения вольфрамовых и комплексных руд [17], причем самой сложной и затратной операцией является их доводка до высоких кондиций (свыше 65 % WO<sub>3</sub>) [1]. Тем не менее разрабатываются новые технологии обогащения и переработки вольфрамового концентрата [18], в том числе и с использованием бедных вольфрамовых концентратов [19]. В последнем случае станет возможным вовлечение в эксплуатацию месторождений, из которых пока получают только низкокачественные вольфрамовые концентраты.

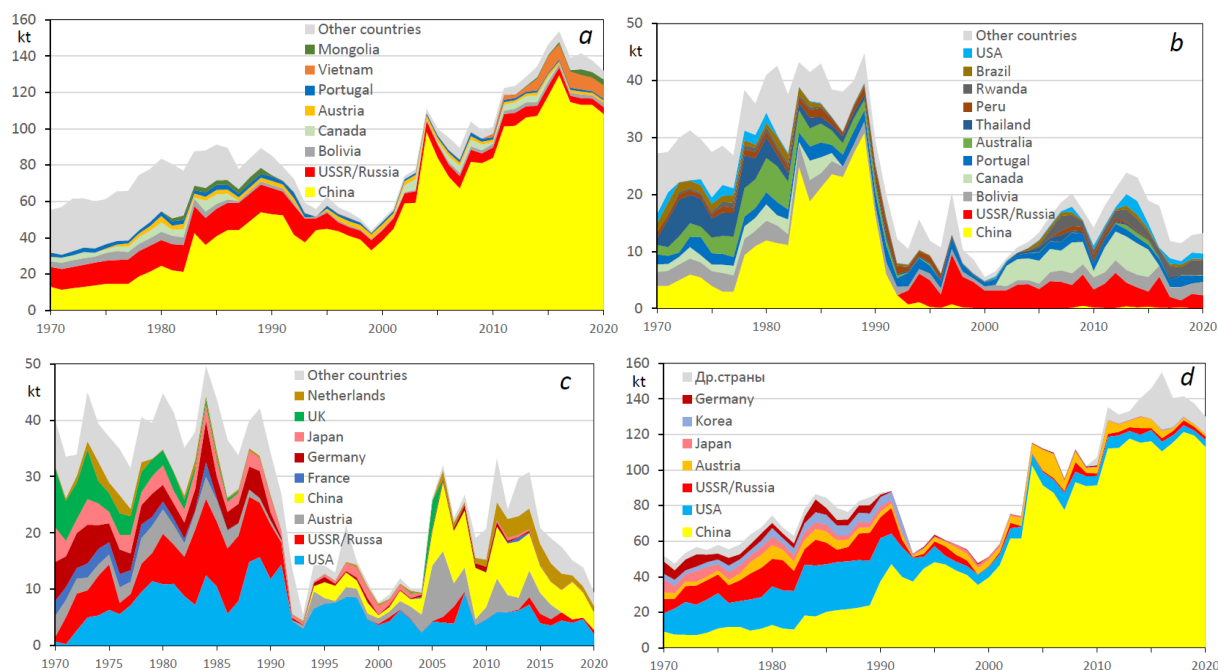


Рис. 1. Динамика мировых товарных потоков вольфрамовых руд и концентратов за 1970–2020 гг. (сортировка по объемам, в метрических тоннах). Составлено по данным [10–16]. а) производство; б) экспорт; в) импорт; д) потребление

Fig. 1. Dynamics of global commodity flows of tungsten ores and concentrates for 1970–2020 (sorted by volumes, in metric tons). Compiled according to [10–16]. a) production; b) export; c) import; d) consumption

Мировое предложение вольфрамовых руд и концентратов возросло с 55 тыс. т в 1970 г. до 91 тыс. т в 1985 г., после чего наметился спад вплоть до 44 тыс. т в 1999 г., а в дальнейшем на фоне роста экономической активности Китая резкое увеличение – вплоть до 154 тыс. т в 2016 г. (рис. 1, а). Изменения в динамике объемов предложения вольфрамовых концентратов

определяются доминированием китайского производства, увеличившего свою долю мировой добычи вольфрама с 24 % (13 тыс. т) в 1970 г. до 84 % (130 тыс. т) в 2016 г. Производство вольфрамового концентрата в СССР, составлявшее в 1970–1980-е гг. 11–15 тыс. т/год (15–20 % от мирового предложения), начиная с 1993 г. начало сокращаться до 5–7 тыс. т/год

(6–14 %) в 1990–2000-е гг. и 3–5 тыс. т/год (2–4 %) в 2010-е гг. [20]. Предложение вольфрамового концентрата из других стран значительно ниже, причем в 1987 г. была практически прекращена добыча вольфрама в США, в 1994 г. – в Южной Корее, в 2016 г. – в Канаде. В 2010 г. начато производство вольфрамового концентрата во Вьетнаме (до 7–9 тыс. т/год), с 2014 г. возрастают объемы добычи вольфрама в Монголии (до 3 тыс. т/год).

В динамике международной торговли вольфрамовыми рудами и концентратами (рис. 1, *b, c*) можно отметить следующие тенденции:

- резкое падение объемов международной торговли вольфрамовыми концентратами в 1991–1993 гг. с 30–40 до 10–12 тыс. т/год, обусловленное сменой торговой политики Китая с переходом на реализацию производного промпродукта (паравольфрамата аммония) с большей прибавочной стоимостью;
- инверсия импорта/экспорта вольфрамового концентрата в СССР/России (импорт в 1980-е гг. 7–12 тыс. т/год) с переходом в 1992 г. на экспорт (3–6 тыс. т/год);
- инверсия экспорта/импорта вольфрамового сырья в Китае – экспорт в 1978–1990 гг. (29–43 тыс. т/год), с переходом после 1994 г. на импорт (4–8 тыс. т/год);
- временное (2002–2015 гг.) появление на рынке экспортного потока вольфрамового концентрата (3–6 тыс. т/год) из Канады в период высоких цен на него;
- появление в 2006–2007 и 2014–2017 гг. встречного (к имеющемуся экспорту) импортного потока вольфрамового сырья в Россию (1–3 тыс. т/год).

Главным экспортером вольфрамовых концентратов в 1970–1992 гг. был Китай с максимальными поставками 30 тыс. т в 1989 г., в последующем периоде – Россия (до 6 тыс. т в 1997 г.), Канада (до 9 тыс. т в 2013 г.), Руанда (до 2,6 тыс. т в 2019 г.) и Боливия (до 2,5 тыс. т в 2015 г.).

Ведущими импортерами вольфрамовых концентратов в течение всего исследуемого периода являются США (4–16 тыс. т/год) и Австрия (1–6 тыс. т/год), в 1970–1980-е гг. значительные объемы импорта поступали в СССР (4–14 тыс. т/год), Германию (3–7 тыс. т/год), Японию (2–6 тыс. т/год) и Британию (1–10 тыс. т/год). В 2000–2010-е гг. выросли объемы импорта в Китай (2–9 тыс. т/год) и Нидерланды (1–3 тыс. т/год).

Лидером потребления вольфрамового концентрата в 1970–1980-е гг. являлись США – 14–28 тыс. т/год (20–35 % мирового спроса), но с 1993 г. наблюдается его снижение до уровня 3–7 тыс. т/год (2–7 %), сохраняемое до настоящего времени (рис. 1, *d*). Китай же, потребляя в 1970-х гг. 7–13 тыс. т/год (10–22 % мирового спроса) вольфрамового концентрата, начиная с 1983 г. наращивает его потребление вплоть до 119 тыс. т (85 % мирового спроса) в 2018 г. В СССР потребление вольфрамового концентрата составляло 8–17 тыс. т/год, а в России в 1990-е гг. оно сократилось до 1–5 тыс. т/год, что сохраняется до настоящего времени. В Австрии за весь исследуемый период имеет место стабильное потребление вольфрамового концен-

трата на уровне 3–7 тыс. т/год. В 1970–1980-е гг. достаточно высокий уровень потребления вольфрамового концентрата (2–7 тыс. т/год) наблюдался в Японии, Южной Корее и Германии, но начиная с 1990-х гг. он сократился до исчезающе малых величин.

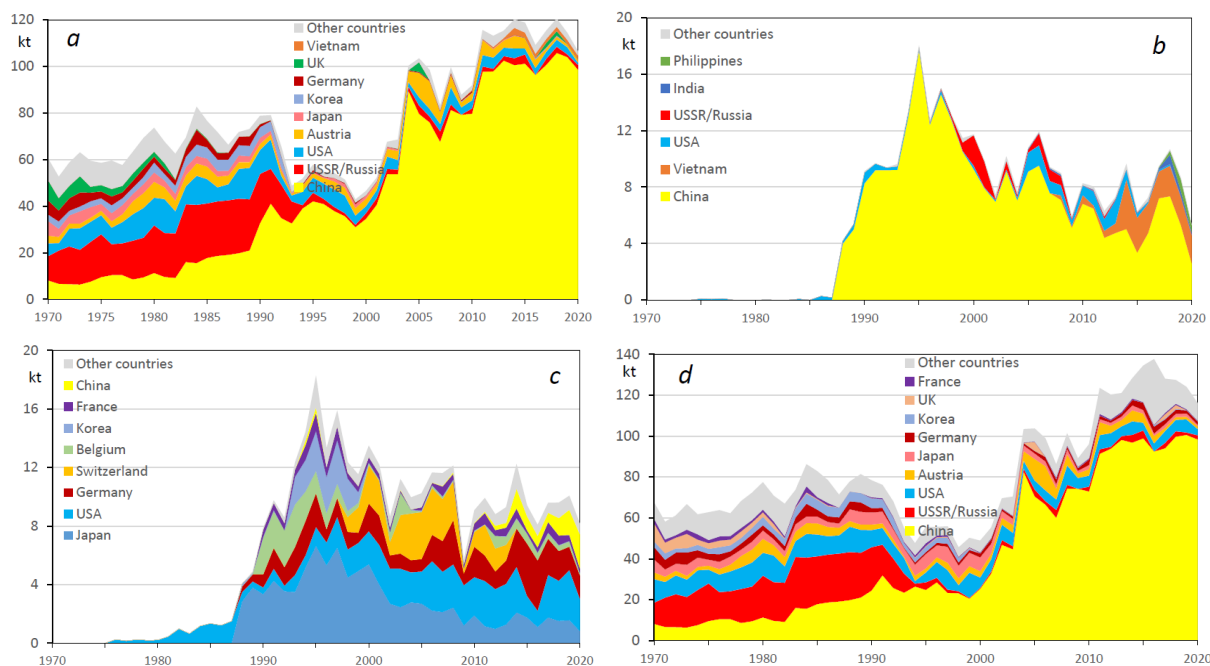
*Паравольфрамат аммония* является промежуточным технологическим продуктом для производства металлического вольфрама и карбида вольфрама, и объемы его производства в первом приближении конформны объемам потребления вольфрамового концентрата. Его производят путем гидрометаллургического передела, включающего автоклавное выщелачивание для шеелитовых концентратов и спекание с содой для вольфрамитовых концентратов [17, 21, 22]. Вольфрамовые отходы также преимущественно перерабатываются на паравольфрамат аммония [23, 24]. По сравнению с вольфрамовыми концентратами паравольфрамат аммония является более стабильным по составу, и поэтому в 1990-е гг. стала возможна инверсия торговых сырьевых потоков с концентратов на паравольфрамат аммония (ПВА), а также появление цехов производства паравольфрамата аммония непосредственно на добывающих производствах.

Мировое производство ПВА в 1970–1980-е гг. составляло 55–79 тыс. т/год, в 1990-е гг. сократилось до 42–52 тыс. т/год, а начиная с 2000 г. начался его рост вплоть до 120 тыс. т в 2014 г. (рис. 2, *a*). Как и для вольфрамовых руд и концентратов изменения в динамике объемов предложения паравольфрамата аммония определяется доминированием его китайского производства, увеличившего свою долю мирового предложения с 13 % (8 тыс. т) в 1970 г. до 88 % (106 тыс. т) в 2018 г. Производство ПВА в СССР, составлявшее в 1970–1980-е гг. 15–25 тыс. т/год (25–35 % от мирового предложения), после 1993 г. составляло 1–4 тыс. т/год. Производство ПВА в США в 1970–1990-е гг. составляло 5–15 тыс. т/год (5–15 % от мирового предложения), но после 1999 г. снизилось до 3–5 тыс. т/год. Весьма устойчив уровень производства ПВА в Австрии – на уровне 3–7 тыс. т/год за весь период. В 1970–1980-е гг. Япония, Южная Корея, Германия и Британия выпускают 2–7 тыс. т/год паравольфрамата аммония, но в дальнейшем производство ПВА в этих странах сократилось до исчезающе малых величин.

ПВА является промежуточным технологическим продуктом для производства металлического вольфрама и карбида вольфрама, и ранее он не был предметом международной торговли. Но начиная с 1998 г. ввиду смены торговой политики Китая произошел переход с внешних поставок вольфрамового концентрата на экспортную реализацию ПВА как более востребованного технологичного сырья устойчивого качества, в отличие от полиминеральных вольфрамовых концентратов. Произошло формирование значительного по объемам мирового рынка ПВА (8–18 тыс. т/год) на фоне падения объемов международной торговли вольфрамовыми концентратами (рис. 2, *b, c*). Во многом это способствовало появлению производства ПВА непосредственно на добывающих предприятиях.

Основным экспортером ПВА является Китай, охватывающий 65–98 % объемов его международной торговли. Несмотря на то, что именно Китай создал новый рынок международной торговли этого вольфрамового продукта, наметился тренд снижения экс-

порта китайского ПВА с 17,7 тыс. т в 1995 г. до 5,4 тыс. т в 2020 г., что обусловлено увеличением объемов национального производства вольфрама металлического и карбида вольфрама.



**Рис. 2.** Динамика мировых товарных потоков паравольфрамата аммония за 1970–2020 гг. (сортировка по объемам, в метрических тоннах). Составлено по данным [10–16]. а) производство; б) экспорт; в) импорт; д) потребление

**Fig. 2.** Dynamics of global commodity flows of ammonium paratungstate for 1970–2020 (sorted by volumes, in metric tons). Compiled according to [10–16]. a) production; b) export; c) import; d) consumption

Начиная с 2008 г. значительные поставки ПВА осуществляет Вьетнам – до 3,5 тыс. т/год (до 39 % мировой торговли).

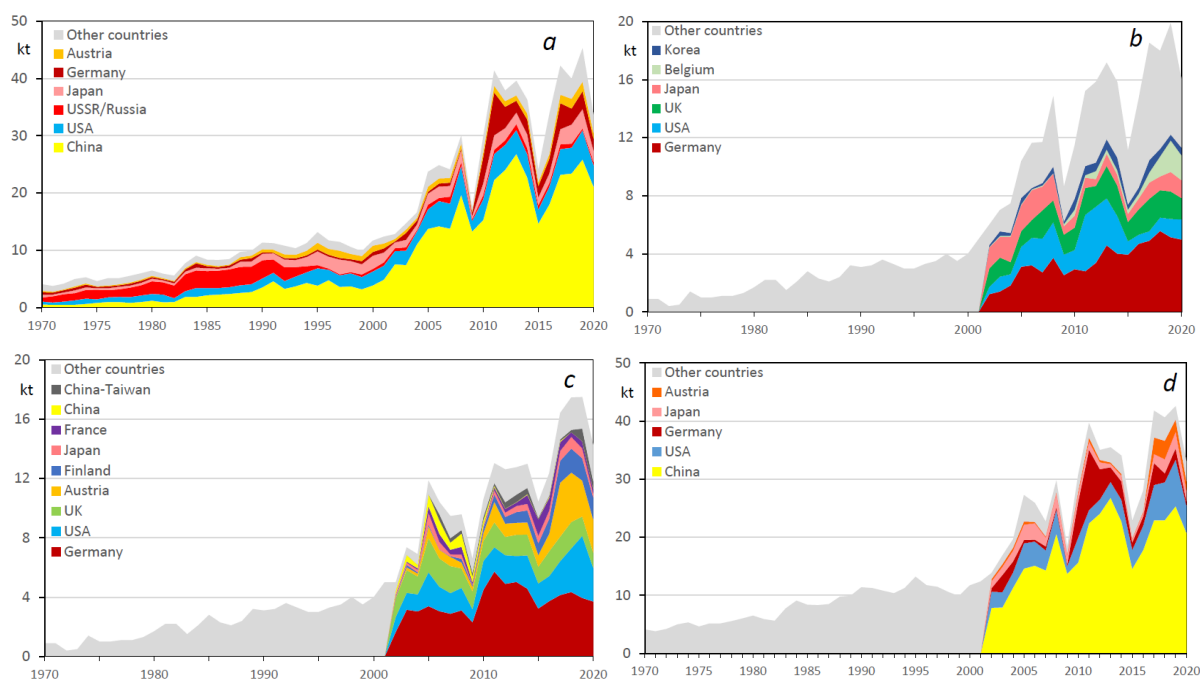
Ведущими импортерами ПВА являются Япония (2,0–6,6 тыс. т/год), США (1,0–3,5 тыс. т/год) и Германия (1,0–3,5 тыс. т/год). В отдельные периоды были закупки ПВА в Швейцарии (до 3,2 тыс. т/год), Корею (до 3,0 тыс. т/год) и Бельгии (до 2,9 тыс. т/год).

Лидером потребления ПВА в 1970–1980-е гг. являлся СССР – 15–25 тыс. т/год (17–29 % мирового спроса), но начиная с 1993 г. наблюдается его быстрое снижение до уровня 0,5–2,5 тыс. т/год (1–4 %), сохраняемое до настоящего времени (рис. 2, d). В США также в 1970–1980-е гг. потребление ПВА составляло 7–12 тыс. т/год (13–19 %), а в дальнейшем наметилось некоторое снижение до 4–7 тыс. т/год с пиком потребления 9,6 тыс. т в 2008 г. Китай же, используя в 1970-х гг. 6–9 тыс. т/год ПВА (11–15 % мирового спроса), начиная с 1983 г. наращивает его потребление и, заняв лидерское положение в 1990 г., продолжает увеличивать востребованность ПВА вплоть до 100 тыс. т (81 %) в 2018 г. Австрия является стабильным потребителем ПВА на уровне 2–7 тыс. т/год. В 1970–1980-е гг. достаточно высокий уровень потребления ПВА (2–6 тыс. т/год) наблюдался в Японии, Германии, Южной Корее и Британии, но начиная с 1990-х гг. он сократился в этих странах до 1–2 тыс. т/год.

Кроме первичных сырьевых вольфрамовых продуктов увеличивается во времени использование вторичных сырьевых вольфрамовых продуктов – вольфрамовых отходов и скрапа, обеспечивающих 15–25 % оборота мировых вольфрамовых продуктов [8].

Переработка вольфрамовых отходов осуществляется в зависимости от материала сборов путем сплавления с селитрой, с цинком, окисления с последующим щелочным выщелачиванием, хлорирования и электрохимической обработки [7, 9, 23].

Объемы мирового предложения вольфрамовых отходов в 1970 г. составляли всего 4 тыс. т, то к 2019 г. они увеличились до 45 тыс. т при темпе прироста объемов сбора отходов +5,0 %/год (рис. 3, a). Если до 1991 г. основное образование отходов приходилось на ведущих потребителей вольфрамовой продукции – СССР (до 3,2 тыс. т/год) и США (до 1,6 тыс. т/год), то в дальнейшем лидерство переходит к Китаю, в 1990-е гг. утилизирующему 3,3–4,8 тыс. т/год, а к 2019 г. нарастившему сбор отходов до 25,9 тыс. т. В 2021 г. была установлена квота утилизации вольфрамовых отходов в 24,8 тыс. т [25]. В 2000–2010-е гг. увеличили объемы сбора вольфрамовых отходов США (2,2–5,1 тыс. т/год), Германия (0,7–7,2 тыс. т/год), Япония (1,0–3,3 тыс. т/год) и Австрия (0,4–1,5 тыс. т/год).



**Рис. 3.** Динамика мировых товарных потоков вторичных сырьевых вольфрамовых отходов (сортировка по объемам, в физическом весе). Составлено по данным [10–16]: а) – производство за 1970–2020 гг. (оценка); б, с) международная торговля (б – экспорт, с – импорт) за 2002–2020 гг., данные из источников [12–15]; д) потребление 2002–2020 гг. (оценка)

**Fig. 3.** Dynamics of global commodity flows of secondary raw tungsten waste (sorted by volumes, in physical weight). Compiled according to [10–16]: а) production for 1970–2020 (assessment); б, с) international trade (б – exports, с – imports) for 2002–2020, data from sources [12–15]; д) consumption 2002–2020 (assessment)

Наиболее достоверные данные по мировой торговле вольфрамовыми отходами (с расшифровкой по странам) имеют место лишь за период 2002–2020 гг. В этом временном интервале наблюдаются следующие тенденции (рис. 3, б, с):

- Германия, Британия и США являются главными участниками международной торговли вольфрамовыми отходами и скрапом, причем как в части экспорта, так и по импорту; на них приходится, соответственно, 25, 13 и 18 % мирового экспорта и 34, 16 и 9 % мирового импорта, т. е. имеются встречные потоки материалов, скорее всего, различного состава и качества;
- из экспортеров вольфрамовых отходов следует отметить также Японию, уменьшившую свой исходящий поток с 24 % доли мировой торговли в 2002 г. до 5 % в 2018 г., а из импортеров – Австрию, увеличившую ввоз с 0,8 % доли мировой торговли в 2002 г. до 22 % в 2017 г.

В потреблении вторичных сырьевых вольфрамовых отходов лидирует Китай с наращиванием объемов их использования с 7,8 тыс. т в 2002 г. до 25,3 тыс. т в 2019 г. (рис. 3, д). Остальные лидеры значительно отстают в потреблении отходов – США (3,4–8,0 тыс. т/год), Германия (0,4–3,7 тыс. т/год), Япония (0,6–2,8 тыс. т/год) и Австрия (0,3–3,2 тыс. т/год).

В динамике предложения суммы первичных и вторичных вольфрамовых отходов повторяются этапы трансформаций добычи вольфрамового концентрата, доминирующего по объемам производства (рост

в 1970–1980-х гг., просадка в 1990-х гг., интенсивный рост в 2000–2010-х гг.), но имеется серьезное увеличение прироста суммарных объемов (до 112 тыс. т в 2019 г.) за счет роста утилизации вольфрамовых отходов (рис. 4, а).

Доли утилизации вольфрамового сырья от выпуска конечных вольфрамовых продуктов (суммарно из первичного и вторичного сырья в пересчете на 100 % W) со временем возрастали и составляли в 1970-е гг. 6,2–7,5 %, в 1980-е гг. – 7,2–10,0 %, в 1990-е гг. – 11,8–18,3 %, в 2000-е гг. – 13,0–22,4 % (с просадкой в кризисный 2009 г.) и в 2010-е гг. – 22,0–24,8 % (с просадкой до 14,1–18,0 % в период спада китайского производства вольфрамовых продуктов в 2015–2016 гг.) (рис. 4, б). В динамике долей объемов международной торговли вольфрамовыми отходами от мировых объемов их утилизации наблюдается отчетливый тренд увеличения с 21 % в 1970 г. до 48 % в 2020 г. (рис. 4, в).

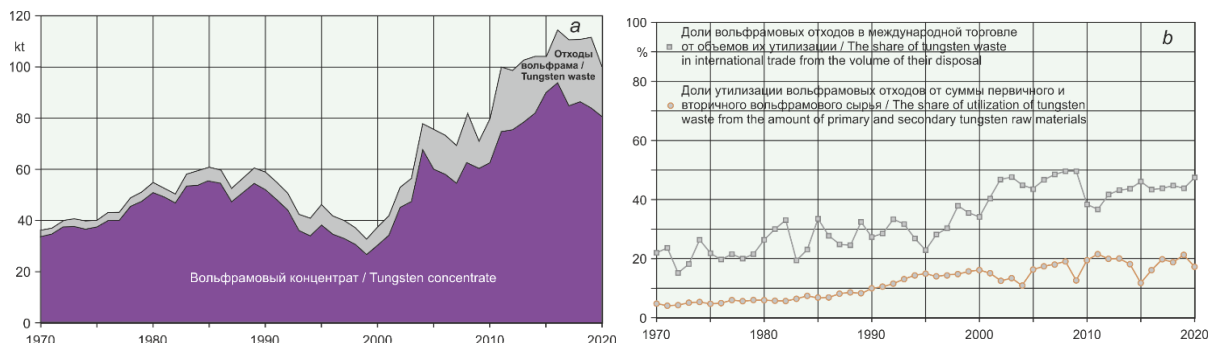
Рассматривая в целом совместную динамику товарных потоков международной торговли первичными и вторичными сырьевыми вольфрамовыми продуктами за 1970–2020 гг. (рис. 5, а–с), следует отметить следующее:

- Увеличение объемов торговли вольфрамовыми концентратами в 1970–1980-х гг. коррелирует с ростом их выпуска в этом периоде (рис. 4, а), просадка международной торговли вольфрамовым сырьем в 1990-е гг. не так значима, как для объемов их производства, интенсивное увеличение



предложения первичных и вторичных сырьевых вольфрамовых продуктов в 2000–2010-е гг. сопро-

вождается лишь небольшим увеличением их продаж (сравнение: рис. 4, а; 5, а).



**Рис. 4.** Объемы предложения первичного и вторичного вольфрамового сырья (а), доли объемов утилизации вольфрамовых отходов от выпуска конечных вольфрамовых продуктов, произведенных из первичного и вторичного сырья, и доли вольфрамовых отходов в международной торговле от объемов их утилизации (б) за 1970–2020 гг., в пересчете на 100 % W. Составлено по данным [10–16]

**Fig. 4.** Volumes of supply of primary and secondary tungsten raw materials (a), the share of volumes of utilization of tungsten waste from the release of final tungsten products produced from primary and secondary raw materials, and the share of tungsten waste in international trade from the volume of its utilization (b) for 1970–2020, in terms of 100 % W. Compiled according to [10–16]

- В 1992 г. в международной торговле сырьевыми вольфрамовыми продуктами произошла инверсия – снижение поставок вольфрамовых концентратов и увеличение предложения ПВА с соответствующим изменением их долей в торговом балансе.
- Доли вольфрамовых концентратов, составлявшие в 1970–1980-е гг. 84–99 % объемов международной торговли суммы всех вольфрамовых сырьевых продуктов, начиная с 1992 г. сократилась до минимума – 25 % в 2000 г., стабилизировалась в дальнейшем (2002–2016 гг.) в интервале 40–52 %, и лишь в 2017–2019 гг. часть этого товарного продукта в сумме сырьевых потоков снизилась до 30–41 %.
- Доля ПВА, заместившего в мировой торговле выпадающий спрос на вольфрамовый концентрат, увеличились с 1 % в 1970–1980-е гг. до 42–59 % в 1992–2003 гг., но в дальнейшем она уменьшилась вплоть до 19 % в 2020 г., став ниже уровня долей вольфрамового концентрата в 2004 г. и долей торговли вольфрамовыми отходами в 2008 г.
- Для вольфрамовых отходов имеются отчетливые тренды приращения как по объемам (с 0,4 тыс. т в физическом весе в 1972 г. до 19,9 тыс. т в 2019 г.), так и по долям международной торговли в сумме сырьевых вольфрамовых продуктов (с 1,1 % в 1972 г. до 42 % в 2019 г.).

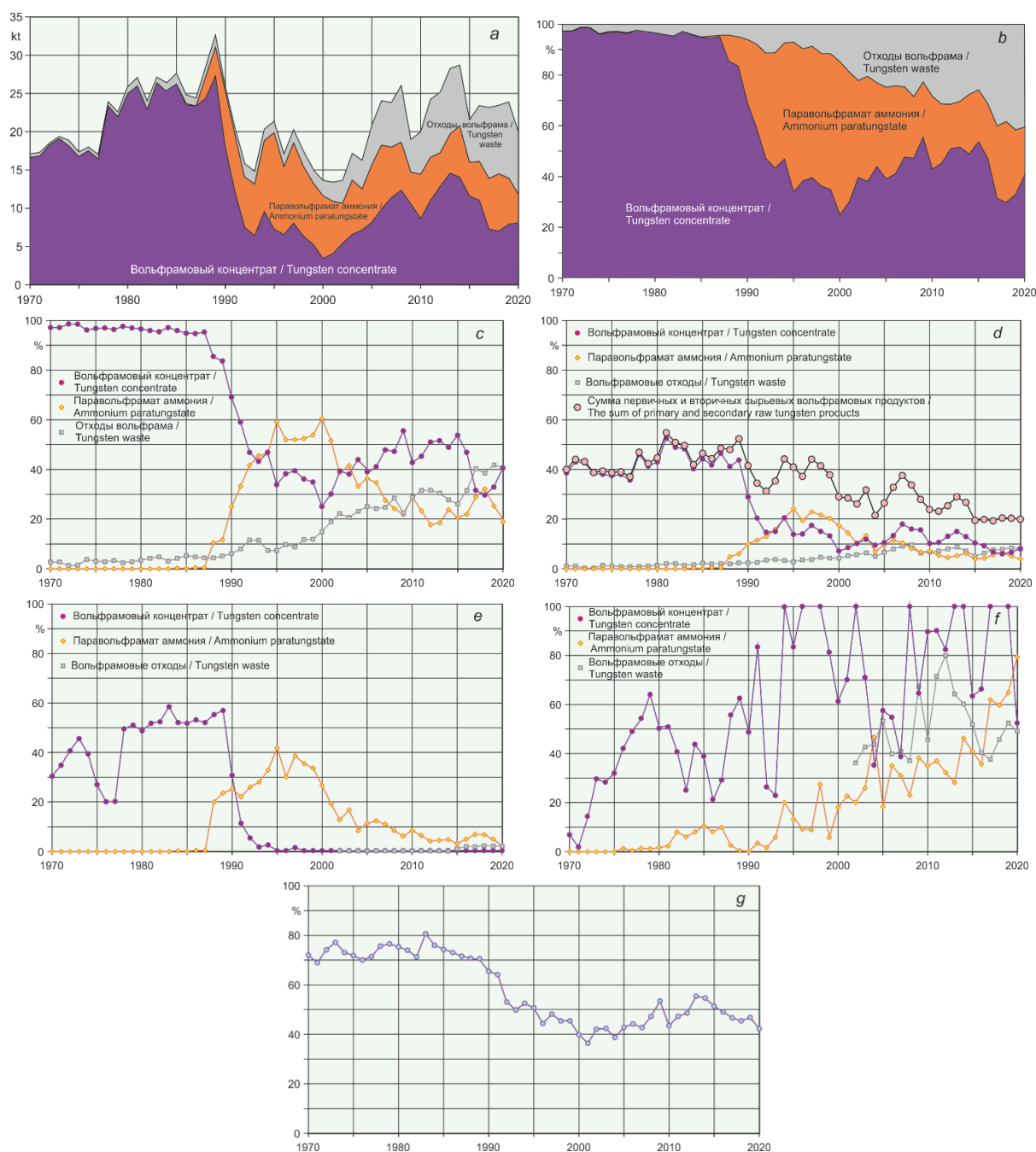
В динамике суммы объемов международной торговли первичным и вторичным вольфрамовым сырьем от объемов производимых из него конечных вольфрамовых продуктов следует отметить, что с первоначального относительно стабильного уровня долей сырья 37–52 % до 1989 г. в дальнейшем наметился тренд снижения сырьевой доли в международной торговле вплоть до 15,1 % в 2020 г. (рис. 5, d). Таким

образом, к настоящему времени сырьевая составляющая вольфрамового сырья в международной торговле суммы всех вольфрамовых продуктов становится практически незначимой.

Динамика долей экспорта ПВА из Китая (абсолютного лидера мирового производства этого продукта) от его выпуска полностью конформна изменениям динамики объемов мировой торговли этим товаром (рис. 5, c, e). В то же время динамика долей экспорта вольфрамового концентрата от китайского производства конформна динамике долей международной торговли лишь в период 1970–2003 гг., а позднее его доля от производства Китая соответственно обнулилась (рис. 5, c, e). Экспорт вольфрамовых отходов из Китая не превышает 1 % от их утилизации.

В динамике долей импорта первичных сырьевых вольфрамовых продуктов в США (лидера их мирового импорта) наблюдается тренд их роста во времени (рис. 5, f): для ПВА – с 2 % в 1976 г. до 82 % в 2020 г.; для вольфрамового концентрата – с 1 % в 1971 г. до 64 % в 1979 г., после чего на фоне колебаний с размахом 20–60 % наблюдается тенденция возрастания значений локальных минимумов с 20 % в 1986 г. до 62 % в 2015 г., когда локальные их максимумы могут быть выше 100 % – до 165 % (торговый транзит) в 2019 г.; для вольфрамовых отходов – с 36 % в 2002 г. до 80 % в 2012 г. после чего наметилось снижение их импорта.

В целом доля объемов сырьевых вольфрамовых продуктов в международной торговле всех вольфрамовых продуктов сократилась с 70–80 % в 1970–1980-е гг. до 36 % в 2001 г. и, несколько приподнявшись, флуктуировала в диапазоне 42–55 % в 2010-е гг. (рис. 5, g).



**Рис. 5.** Динамика мировых товарных потоков международной торговли первичными (вольфрамовый концентрат и ПА) и вторичными (вольфрамовые отходы и скрап) сырьевыми вольфрамовыми продуктами за 1970–2020 гг. (исходные данные в пересчете на 100 % W). Составлено по данным [10–16]. а) объемы сырьевых товарных вольфрамовых продуктов; б) доли сырьевых товарных вольфрамовых продуктов в сумме их объемов; в) доли объемов международной торговли первичными и вторичными сырьевыми вольфрамовыми продуктами от их суммарного мирового предложения; д) доли объемов международной торговли индивидуальными сырьевыми вольфрамовыми продуктами от суммарных мировых объемов произведенных из них конечных вольфрамовых продуктов; е) доли экспорта Китая от его национального производства; ф) доли импорта США от его национального потребления; г) доли объемов международной торговли сырьевыми вольфрамовыми продуктами от суммарных мировых объемов всех вольфрамовых продуктов

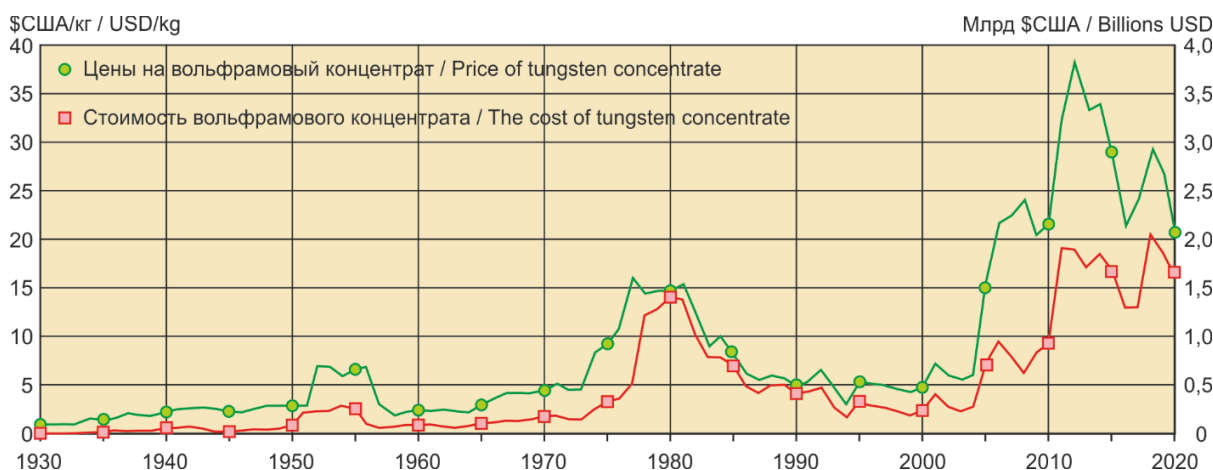
**Fig. 5.** Dynamics of global commodity flows of international trade of primary (tungsten concentrate and ammonium paratungstate) and secondary (tungsten waste and scrap) raw tungsten products for 1970–2020 (initial data in terms of 100 % W). Compiled according to [10–16]. a) volumes of raw tungsten commodity products; b) shares of raw tungsten commodity products in the sum of their volumes; c) shares of international trade volumes of primary and secondary raw tungsten products from their total world supply; d) share of international trade volumes of individual raw tungsten products from the total world volumes of final tungsten products produced from them; e) share of China's exports from its national production; f) share of US imports from its national consumption; g) share of international trade volumes of raw tungsten products from the total world volumes of all tungsten products



*Цены на сырьевые вольфрамовые продукты.* Наиболее полные данные по динамике цен за 1930–2020 гг. собраны для вольфрамовых концентратов на рынке США (в пересчете на 1 кг 100 % W) (рис. 6). Кроме обычного инфляционного роста цен (до +1,0 %/год) были периоды их значительного повышения:

- в 1952–1956 гг. 5,9–7,0 USD/kg на фоне 2–3 USD/kg (рост 335–345 %) приходится на период значительного послевоенного роста мирового потребления вольфрамовых продуктов (+11,9 %/год), приведшего к увеличению объемов добычи вольфрамового сырья в Китае, США и СССР;

- с 4,5 USD/kg в 1973 г. до 14–16 USD/kg в 1977–1981 гг. (рост 310–360 %) после отмены золотого обеспечения доллара США и последующего мирового энергетического кризиса, когда выросли цены на все товарные продукты; падение цен на вольфрамовое сырье произошло только в конце 1980-х гг. до 4–6 USD/kg в результате бурного роста добычи вольфрамового сырья в Китае начиная с 1985 г.;
- с 6,3 USD/kg в 2004 г. до абсолютного максимума 38,08 USD/kg в 2011 г. (до 600 % роста) в результате бурного роста экономики Китая, сопровождавшегося резким увеличением национального потребления вольфрамовых продуктов.

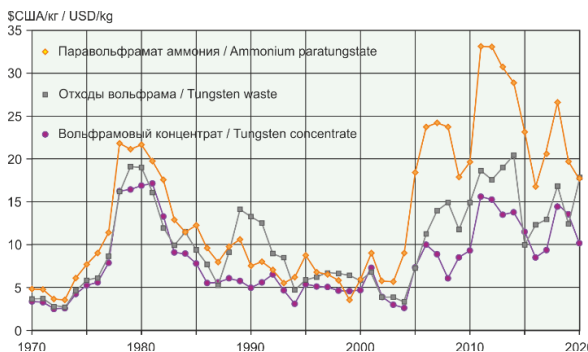


**Рис. 6.** Динамика цены (в пересчете на содержание 100 % W) и стоимости (оценка) вольфрамовых концентратов за 1930–2020 гг. Составлено по данным Геологической службы США [11], информационного агентства TrendEconomy [12] и информационной службы ООН [14]

**Fig. 6.** Dynamics of price (in terms of 100 % W content) and cost (estimate) of tungsten concentrates for 1930–2020. Compiled according to the US Geological Survey [11], the TrendEconomy [12] and the UN Information Service [14]

Цены на остальные вольфрамовые продукты (рис. 7) повторяют динамику цен на вольфрамовый концентрат с различной степенью интенсивности изменений. Отчетливо наблюдается всплеск цен в 1977–1981 гг.: ПВА – с 4–5 до 20–22 USD/kg (рост 440–500 %), вольфрамовые отходы – с 3–5 до 16–19 USD/kg (380–450 %). В дальнейшем с 1983 г. цены на сырьевые вольфрамовые продукты снизились до уровня начала 1970-х гг. В 2001–2003 гг. начался рост цен на все вольфрамовые продукты, продолжавшийся до их относительной стабилизации в 2007–2020 гг.: паравольфрамат аммония – с 5–9 до 17–26 USD/kg (рост 290–340 %), вольфрамовые отходы – с 4–6 до 12–20 USD/kg (300–330 %). Следует отметить локальные периоды просадки цен одновременно для всех вольфрамовых продуктов в 2009–2010 гг. (последствия всемирного финансового кризиса) и в 2015–2016 гг. (отклик на временное избыточное предложение вольфрамовых продуктов, в первую очередь из Китая) [26] (рис. 7).

Следует отметить, что изменения цен на ферровольфрам (учитываемый как конечный товарный продукт) за весь исследуемый период – 1970–2020 гг. – и по величине, и по динамике больше коррелируют с сырьевыми вольфрамовыми продуктами, нежели с конечными товарами (вольфрамом металлическим и карбидом вольфрама).



**Рис. 7.** Динамика среднмировых цен товарных сырьевых вольфрамовых продуктов в физическом весе за 1970–2020 гг. Составлено по данным [11, 12, 14, 16]

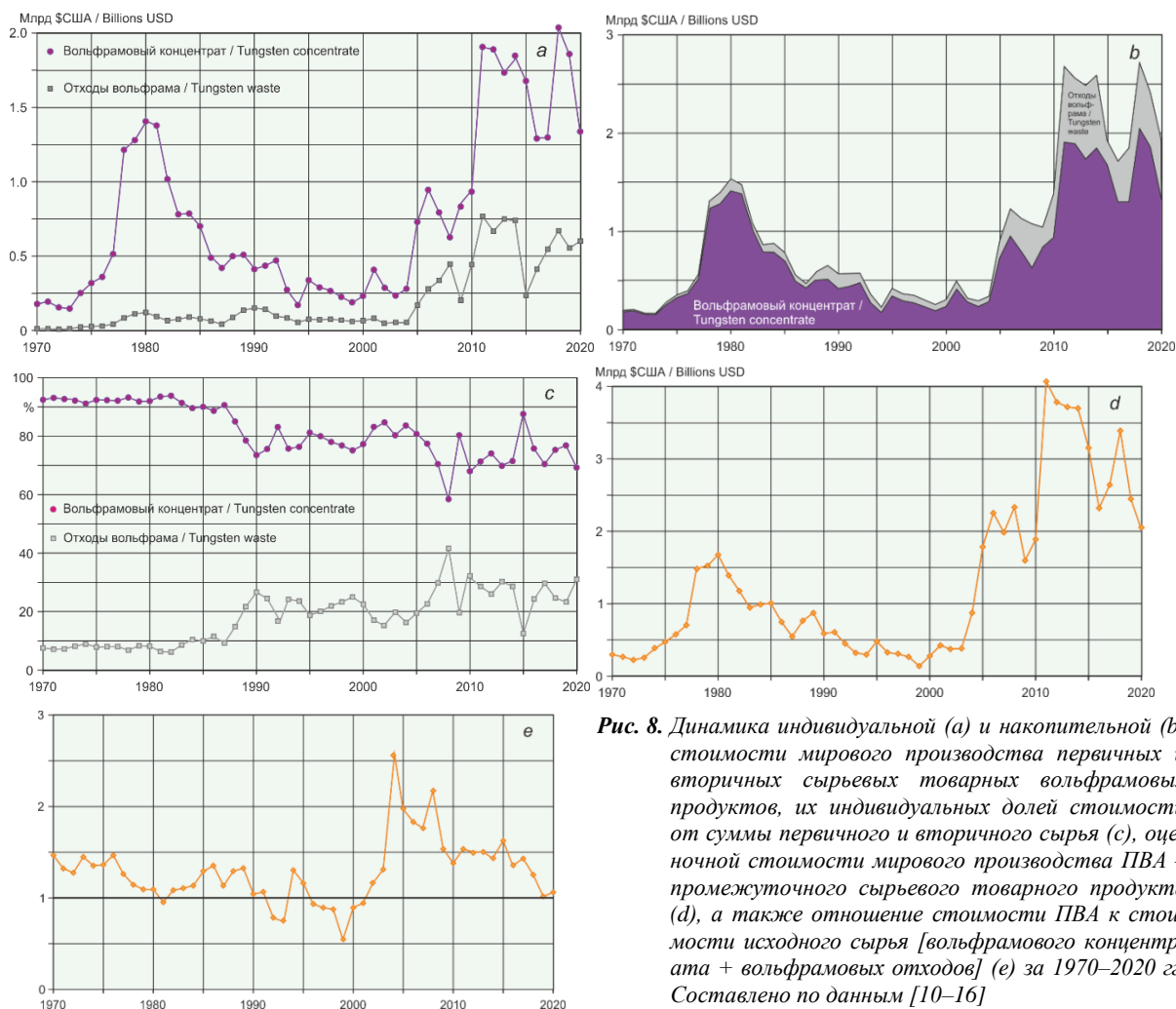
**Fig. 7.** Dynamics of global average prices of commodity tungsten products in physical weight for 1970–2020. Compiled according to [11, 12, 14, 16]

*Стоимость товарных потоков сырьевых вольфрамовых продуктов.* Динамика оцененной стоимости добытого первичного вольфрамового концентрата в длительном периоде 1930–2020 гг. конформна динамике изменений его цен (рис. 6) в периодах их повышения в 1952–1956 гг. (до 289 млн USD/год), в 1973–1985 гг. (до 1,4 млрд USD/год) и в 2004–2020 гг.

(до 2,0 млрд USD/год). Ценовой фактор является определяющим в формировании стоимости вольфрамового сырья – коэффициент корреляции пары показателей цены и стоимости вольфрамового концентрата составляет 0,98, в то время, когда корреляция объемов производства вольфрамового концентрата и его стоимости значительно ниже – 0,84.

Если в 1970–1990-х гг. стоимость утилизированных вольфрамовых отходов была невелика (12–15 млн USD/год), то начиная с 1999 г. она увеличиваться – с

22 млн USD в 1999 г. до 769 млн USD в 2011 г., и остается на высоком уровне до настоящего времени (рис. 8, а, б). Доли вольфрамовых отходов в предложении суммы первичного и вторичного сырья в начальный период 1970–1987 гг. составляли 7–11 %, в 1988–2006 гг. – 15–25 %, в 1997–2020 гг. – 24–42 % с просадками в период экономического кризиса 2009 г. до 20 % и в период кризиса китайского потребления 2015 г. до 15 % (рис. 8, с). Налицо тенденция роста востребованности утилизации все больших объемов вольфрамовых отходов.



**Рис. 8.** Динамика индивидуальной (а) и накопительной (б) стоимости мирового производства первичных и вторичных сырьевых товарных вольфрамовых продуктов, их индивидуальных долей стоимости от суммы первичного и вторичного сырья (с), оценочной стоимости мирового производства ПВА – промежуточного сырьевого товарного продукта (д), а также отношение стоимости ПВА к стоимости исходного сырья [вольфрамового концентрата + вольфрамовых отходов] (е) за 1970–2020 гг. Составлено по данным [10–16]

**Fig. 8.** Dynamics of individual (a) and (b) cumulative cost of world production of primary and secondary commodity tungsten products, their individual cost shares from the sum of primary and secondary raw materials (c), estimated cost of world production of ammonium paratungstate – intermediate commodity product (d), as well as the ratio of the ammonium paratungstate cost to the cost of raw materials [tungsten concentrate + tungsten waste] (e) for 1970–2020. Compiled according to [10–16]

ПВА является промежуточным продуктом переработки вольфрамового сырья и большей частью без стадии торговли перерабатывается на конечные вольфрамовые продукты непосредственно в технологическом процессе производства вольфрама металлического и карбида вольфрама. Но этот продукт с 1988 г. занимает значительную долю мировой торговли вольфрамовым сырьем, и для сравнительной оценки его товарных потоков произведена оценка стоимости производства ПВА на основе среднемиро-

вых цен (рис. 8, д). Отношение стоимости ПВА к стоимости исходного сырья (вольфрамового концентрата + вольфрамовых отходов) ожидаемо выше 1,0 и наибольшее в период роста цен на все вольфрамовые продукты в 2004–2015 гг. (рис. 8, е).

В динамике стоимости международной торговли сырьевых вольфрамовых продуктов отмечаются те же самые периоды изменений, что и для динамики стоимости их производства: подъем в 1970–1980-е гг., спад в 1990-е гг. и рост в 2000–2010-е гг. (рис. 9).

Стоимость мировой торговли вольфрамовым концентратом возрастала в первый период с 90 млн USD в 1970 г. до 728 млн USD в 1981 г., но в дальнейшем, ввиду сокращения объемов продаж и замены в торговле концентрата на ПБА, к 1992 г. стоимость годового предложения этого продукта снизилась до 80 млн USD. В период 2005–2020 гг. ввиду роста цен на концентрат его торговая стоимость увеличилась до 120–320 млн USD/год (рис. 9, *a, b, e*). Доли стоимости торговли вольфрамовым концентратом от вольфрамового сырья снизились с 91–99 % в 1970–1988 гг. до 27 % в 1995 г. и находились в диапазоне 25–45 % до настоящего времени (рис. 9, *c, d*). Доли стоимости всех вольфрамовых продуктов от их общей суммы ожидаемо имеют более низкие значения: снижение с 48–69 % в 1970–1987 гг. до 3 % в 2000 г. и исключительно низкий уровень – 3–8 % – до настоящего времени (рис. 9, *f, g*). Доли стоимости торговли вольфрамовым концентратом от стоимости его мирового производства в 1970–1980-е гг. составляли 41–52 %, в начале 1990-х гг. они упали до 17 %, а с 1992 г. находятся в диапазоне 8–21 %, снижаясь во времени (рис. 9, *h*).

Динамика стоимости мировой торговли ПБА имеет тенденцию к росту с 3 млн USD в 1986 г. до 156 млн USD в 1997 г. (период замещения в торговле вольфрамового концентрата соразмерными объемами ПБА) с последующим низким уровнем – 40–89 млн USD/год – в 1998–2004 гг., в дальнейшем в результате увеличения цен на все вольфрамовые продукты стоимость ПБА в мировой торговле возрастает – 95–279 млн USD/год (рис. 9, *a, b*). Доли стоимости торговли ПБА от стоимости всего вольфрамового сырья возрастали с 1,3 % в 1986 г. до 66 % в 1995 г., после чего начался тренд снижения вплоть до 18 % в 2020 г. (рис. 9, *c, d*). Доли стоимости торговли ПБА от суммы всех вольфрамовых продуктов соответственно изменялись (на более низком уровне) с 0,6 % в 1986 г. до 19 % в 1995 г. с дальнейшим снижением до 3 % в 2000 г., после чего отмечается весьма низкий уровень – 3–8 % – до настоящего времени (рис. 9, *f, g*). Доли стоимости мировой торговли ПБА от стоимости его производства повторяет динамику его долей в сумме стоимости сырьевых продуктов (рис. 9, *d, g*), возрастая с 0,4 % в 1986 г. до 32 % в 1995 г., после чего начался тренд снижения вплоть до 5 % в 2020 г. (рис. 9, *h*).

Стоимость мировой торговли вольфрамовыми отходами в 1970–2004 гг. была невысокой ввиду их низких цен (3–25 млн USD/год) с небольшим всплеском до 40–25 млн USD/год в 1990–1995 гг. (в период увеличения объемов утилизации вольфрамсодержащих военных материалов), но начиная с 2005 г. появился тренд роста стоимости отходов на фоне увеличения и цены и объемов поставок этого товарного продукта вплоть до максимума в 324 млн USD в 2014 г. По долям стоимости международной торговли вольфрамовыми отходами от стоимости вольфрамового сырья низкий уровень наблюдался в период 1970–1995 гг. (3–8 %) с всплеском до 13–21 % в 1989–1993 гг. и последующий тренд роста доли торговли отходами вплоть до 56 % в 2020 г. (рис. 9, *c, d*). Доли стоимости торговли вольфрамовыми отходами от стоимости сум-

мы всех вольфрамовых продуктов изменялись аналогично последним (на более низком уровне) – 1–4 % в 1970–2004 гг. с небольшим подъемом в 1989–1993 гг. (5–8 %) и дальнейшим слабым ростом до 9 % в 2020 г. (рис. 9, *f, g*). Доли стоимости международной торговли вольфрамовыми отходами от стоимости их мирового производства имеют общую тенденцию к росту с 20 % в 1970 г. до 48 % в 2020 г. (рис. 9, *h*).

На рис. 9, *i* приводится динамика изменений стоимости мирового производства сырьевых вольфрамовых продуктов, а также стоимости международной торговли вольфрамовым сырьем и суммы вольфрамовых продуктов. Доли стоимости международной торговли вольфрамовым сырьем от их мирового производства имеют общий тренд сокращения за анализируемый период с 47 % в 1970 г. до 27 % в 2020 г., причем в 1995–2001 гг. имело место увеличение долей торговли сырьем за счет выхода на мировой рынок России, начавшей активный экспорт вольфрамового концентрата (рис. 9, *j*). Доля стоимости вольфрамового сырья в мировой торговле от суммы всех вольфрамовых продуктов сократилась с 60–70 % в 1970–1980-е гг. до 15–20 % в 2010-е гг. (рис. 9, *j*).

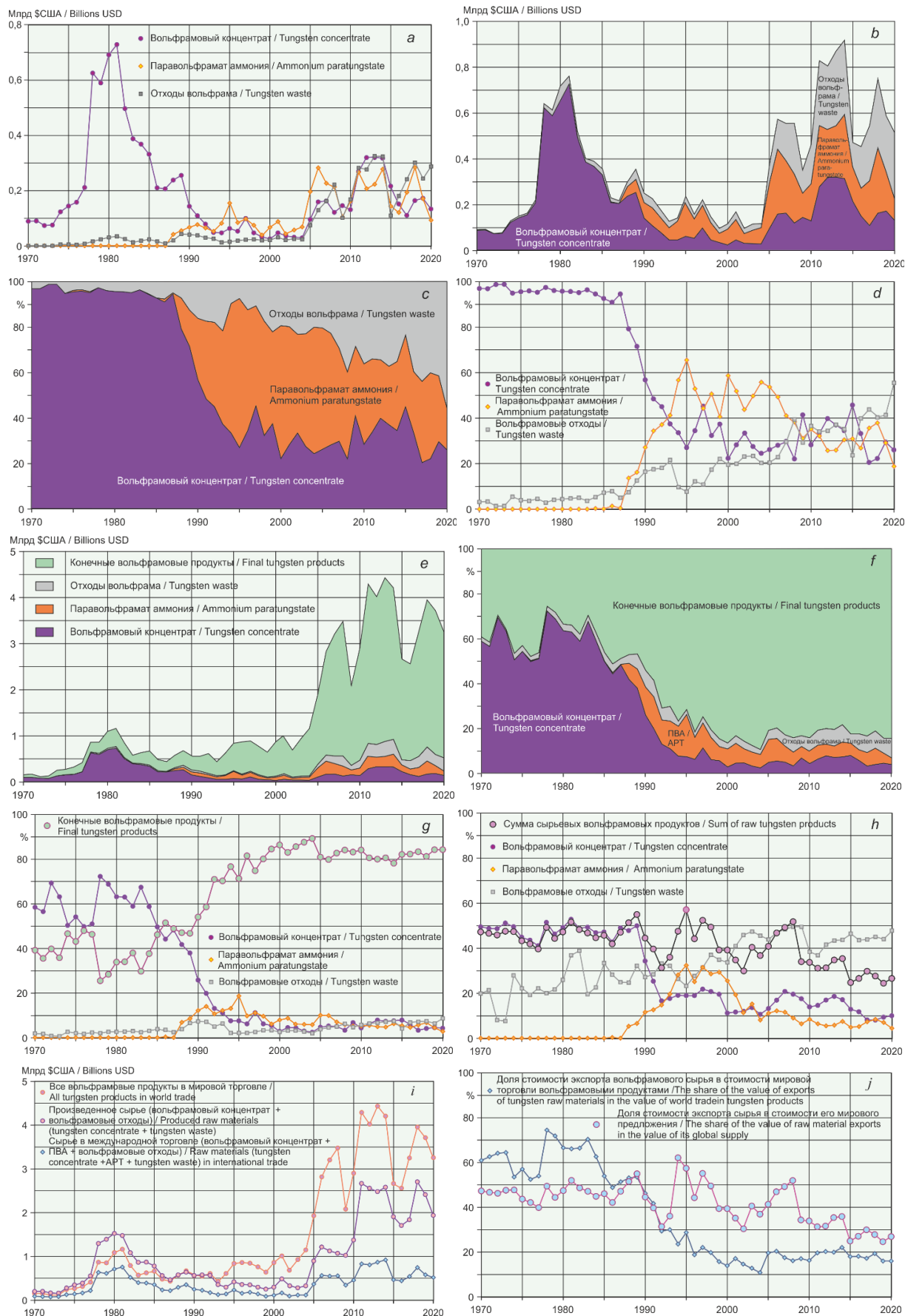
#### Обсуждение результатов и выводы

Мировая добыча первичного вольфрамового сырья выросла с 4–7 тыс. т/год (100 % W) в 1913–1915 гг. до 75–90 тыс. т/год (100 % W) в 2011–2020 гг. с темпом прироста за более чем столетний период +2,9 %/год.

Утилизация вторичного вольфрамового сырья в целом по миру выросла с 2–3 тыс. т/год (100 % W) в 1970-е гг. до 14–23 тыс. т/год (100 % W) в 2008–2020 гг. с темпом прироста +4,3 %/год. Доля мировой утилизации вольфрамовых отходов от суммы первичного и вторичного вольфрамового сырья увеличилась с 5–6 % в 1970-е гг. до 21 % в 2019 г.

В динамике изменений мирового спроса на вольфрамовые продукты за последние 50 лет произошли значимые трансформации, обусловленные политическими и экономическими факторами:

- В 1970–1980-е годы был период медленно растущего мирового потребления вольфрамовых продуктов с темпами прироста спроса на вольфрамовое сырье +3,4 %/год.
- В 1990-е годы – значительное сокращение спроса на вольфрамовые продукты (–6,9 %/год) в военной сфере (завершение холодной войны); в торговле вольфрамовым сырьем – замена предложения вольфрамового концентрата на ПБА; сокращение присутствия России на вольфрамовом рынке (последствия стагнации российской экономики, в первую очередь, металлообработки).
- В 2000–2010-е гг. – значительный рост мирового потребления конечных вольфрамовых товарных продуктов, в первую очередь карбида вольфрама, ввиду экспоненциального наращивания возможностей китайской промышленности и, соответственно, мирового спроса и предложения вольфрамового сырья. Темпы прироста спроса на вольфрамовое сырье в этот период составили +6,4 %/год.





**Рис. 9.** Динамика стоимости международной торговли сырьевыми товарными вольфрамовыми продуктами (а), накопленной стоимости в абсолютном (b) и относительном (с) исчислении, доли индивидуальных сырьевых продуктов в общей стоимости мировой торговли всего вольфрамового сырья (d), суммарной стоимости международной торговли продуктами вольфрамового сырья и суммы стоимости конечных вольфрамовых продуктов в абсолютном (e) и относительном (f) исчислении, долей стоимости отдельных продуктов вольфрамового сырья и суммы стоимости конечных вольфрамовых продуктов (g), долей стоимости международной торговли индивидуальными сырьевыми вольфрамовыми продуктами и суммы сырья в стоимости соответствующего их мирового производства (h), а также стоимости мирового производства и международной торговли первичным вольфрамовым сырьем и суммы вольфрамовых продуктов (i), а также долей стоимости международной торговли сырьем от его производства и мировой торговли всеми вольфрамовыми продуктами (j) за 2002–2020 гг. Составлено по данным [10–16]

**Fig. 9.** Dynamics of the value of international trade of raw commodity tungsten products (a), accumulated value in absolute (b) and relative (c) terms, share of individual raw products in the total value of world trade of tungsten raw materials (d), total cost of international trade of tungsten raw materials products and the sum of the cost of final tungsten products in absolute (e) and relative (f) terms, share of the cost of individual tungsten raw materials products and the sum of the cost of final tungsten products (g), share of the value of international trade of individual raw tungsten products and their sum in the value of their global production (h), as well as the cost of world production and international trade of primary tungsten raw materials and all tungsten products (i) and share of the cost of international trade of raw material from production and world trade all tungsten products (j) for 2002–2020. Compiled according to [10–16]

- Имеются временные просадки мировой торговли сырьевыми вольфрамовыми продуктами в период мирового финансового кризиса 2008–2009 гг. и в период избыточного предложения конечных вольфрамовых продуктов на мировом рынке в 2014–2016 гг.

Лидерами добычи вольфрамовых руд и концентратов к 2020 г. являются: Китай (108 тыс. т в физическом весе, 82 % от мирового предложения), Вьетнам (7,3 тыс. т, 5,5 %), Россия (3,9 тыс. т, 3,0 %), Монголия (3,1 тыс. т, 2,4 %) и Боливия (2,2 тыс. т, 1,7 %).

Лидерами производства ПВА к 2020 г. являются (оценка): Китай (98 тыс. т, 98 % от мирового предложения), Россия (2,1 тыс. т, 2,0 %), Вьетнам (1,7 тыс. т, 1,6 %), Австрия (1,2 тыс. т, 1,1 %) и США (0,9 тыс. т, 0,8 %).

Лидерами утилизации вольфрамовых отходов и скрапа к 2020 г. являются: Китай (21 тыс. т, 62 % от мирового предложения), США (3,7 тыс. т, 11 %), Германия (2,1 тыс. т, 6,2 %), Япония (2,0 тыс. т, 5,9 %) и Австрия (1,0 тыс. т, 3,0 %).

На промышленность Китая приходится до 84 % мировой добычи вольфрамовых руд и концентратов, до 88 % выпуска ПВА и до 81 % сбора вольфрамовых отходов. Поэтому в динамике изменений объемов мировых товарных потоков вольфрамовых продуктов отчетливо видна ведущая роль китайской продукции (таблица). Именно торговая политика Китая по сдерживанию экспорта сырьевых вольфрамовых продуктов и определяет фактическую динамику изменений объемов этих товаров на мировых рынках предложения, спроса и потребления.

Динамика производных показателей изменения (прироста/спада) объемов мировых товарных потоков не критична только для вольфрамовых концентратов (менее  $\pm 5$  %/год), но для китайских потоков этого сырья все же имеет место системный спад экспорта (–8,3 %/год) и ускоренный рост объемов национального потребления (+5,2 %/год).

Для объемов мировых товарных потоков ПВА имеет место высокий показатель роста интенсивности импортного потока (+8,1 %/год) при отсутствии уве-

личения роста темпов экспорта. Это обусловлено динамикой китайского рынка ПВА – ростом производства (+5,1 %/год) и потребления (+5,1 %/год) с параллельным ростом импорта (+7,8 %/год).

**Таблица.** Темпы изменений объемов товарных потоков сырьевых вольфрамовых продуктов по Китаю и всему миру за 1970–2020 гг., %/год

**Table.** Rate of change in the volume of commodity flows of raw tungsten products in China and the world for 1970–2020, %/year

Объект Object	Производство Production	Экспорт Export	Импорт Import	Потребление Consumption
Вольфрамовые руды и концентраты Tungsten ores and concentrates				
Мир World	+1,7	–1,4	–2,9	+1,3
Китай China	+4,3	–8,3	+4,8	+5,2
Паравольфрамат аммония/Ammonium paratungstate				
Мир World	+1,1	+0,7	+8,1	+1,3
Китай China	+5,1	–1,4	+7,8	+5,1
Вольфрамовые отходы и скрап/Tungsten waste and scrap				
Мир World	+4,3	+5,6	+6,0	+6,0
Китай China	+7,5	0,0	–7,5	+5,6

Цветом обозначены позиции с темпами прироста +5...+10 %.

The color indicates positions with growth rates of +5...+10 %.

Наибольшие изменения в динамике товарных потоков у вольфрамовых отходов: увеличение мирового экспорта (+5,6 %/год) и импорта (+6,0 %/год) и, соответственно, у потока потребления (+6,0 %/год). Это обусловлено увеличением производства (+7,5 %/год) и потребления (+5,6 %/год) этих вторичных продуктов в Китае, причем в условиях отсутствия экспорта из Китая и снижения китайского импорта (–7,5 %/год).

В целом во времени имеется системное снижение доли международной торговли первичного вольфрамового сырья (вольфрамовых руд и концентратов) на фоне роста объемов его товарного производства, временный всплеск в 1990-е гг. международной торговли

промежуточными вольфрамовыми продуктами (ПВА и производного от него оксида вольфрама) и системное увеличение объемов утилизации вторичного вольфрамового сырья (вольфрамовых отходов и скрапа) и его предложения для мировой торговли.

В динамике международной торговли вольфрамовым сырьем за последние 50 лет следует отметить следующие знаковые события и тенденции:

- инверсия экспорта/импорта вольфрамового сырья (вольфрамовых концентратов и ПВА) в Китае с окончательным переходом в 1994 г. на его импорт;
- инверсия импорта/экспорта вольфрамового концентрата в СССР/России с переходом в 1992 г. на его преимущественный экспорт;
- появление в 1988 г. и быстрое насыщение мирового рынка новым для него сырьевым продуктом – ПВА, вплоть до максимума в 18 тыс. т в 1995 г. (27 % от суммы торговли первичным и вторичным вольфрамовым сырьем) и дальнейшее уменьшение его продаж до 5 тыс. т в 2020 г. (4,3 %);
- доли вольфрамового концентрата в сумме объемов торговли вольфрамовым сырьем в 1970–1980-е гг. медленно росли с 40 % в 1970 г. до 49 % в 1989 г., но в дальнейшем, ввиду перехода торговли с первичного концентрата на промежуточный ПВА, произошло резкое снижение доли вольфрамового концентрата до 17,8 % в 1992 г., и вплоть до 8,0 % в 2018 г., что однозначно показывает усиление непривлекательности международной торговли первичным вольфрамовым сырьем (впервые очередь со стороны Китая);
- значительный рост объемов международной торговли вторичным сырьем (вольфрамовых отходов и его скрапа) с сопутствующим ростом их доли в суммарных объемах торговли первичным и вторичным вольфрамовым сырьем (с 21 % в 1970 г. до 48 % в 2020 г.);
- общий тренд сокращения долей мировой торговли вольфрамовым сырьем от суммы стоимости добытого первичного и утилизированного вторичного сырья по объемам и стоимости, соответственно, с 39 и 47 % в 1970 г. до 21 и 27 % в 2020 г.

В 2020 г. мировой экспорт сырьевых вольфрамовых продуктов составил 13,2 тыс. т вольфрамовых руд и концентратов, 5,4 тыс. т ПВА и 16,1 тыс. т вольфрамовых отходов. Главным экспортером вольфрамовых концентратов в 1970–1992 гг. был Китай, в последующем периоде – Россия. Значимые поставки на экспорт вольфрамовых руд и концентратов осуществляют также Руанда и Боливия. Основным экспортером ПВА является тот же Китай, а с 2008 г. значительные поставки этого продукта осуществляет Вьетнам. В экспорте вольфрамовых отходов лидируют Германия, Британия, США и Япония.

Главными импортерами сырьевых вольфрамовых продуктов к настоящему времени являются: для вольфрамовых концентратов – Китай и США, для ПВА – Германия, США и Япония, для отходов вольфрама – Германия, США, Австрия и Британия. Следует отметить, что для Германии, Британии и США

имеются встречные потоки импорта и экспорта вольфрамового сырья, скорее всего, различного состава и качества. Все вышеперечисленные страны-импортеры (кроме Китая) являются промышленно развитыми, но выработавшими собственные вольфрамовые месторождения и поэтому критически зависимыми от импорта вольфрамовых продуктов. Примечательно увеличение в последние годы импорта ПВА и вольфрамовых отходов во множество других стран, самостоятельно перерабатывающих их малые объемы для собственных нужд (Тайвань, Чехия, Швеция, Италия и др.) или для транзитной торговли (Нидерланды, Бельгия, Сингапур, Гонконг и др.).

Мировое потребление сырьевых вольфрамовых продуктов в 2020 г. составило 130 тыс. т вольфрамовых руд и концентратов (в физическом весе), 116 тыс. т ПВА и 32 тыс. т вольфрамовых отходов.

Лидером потребления вольфрамового концентрата в 1970–1980-е гг. являлись США (20–35 % мирового спроса), но начиная с 1993 г. наблюдается значительное снижение его спроса (до 3 % в 2020 г.). Китай с 1983 г. наращивает его переработку внутри страны, в 1990 г. становится мировым лидером потребления и продолжает увеличивать объемы его переработки вплоть до 119 тыс. т в 2018 г. (85 % мирового спроса). СССР в 1980-е гг. занимал 2-е место в мировом рейтинге потребления вольфрамового концентрата, но в России в 1990-е гг. оно значительно сократилось. 4-е место по переработке вольфрамового концентрата традиционно сохраняет Австрия. В 1970–1980-е гг. достаточно высокий уровень переработки вольфрамового концентрата наблюдался в Японии, Южной Корее и Германии, но начиная с 1990-х гг. объемы его передела сократились в этих странах до исчезающе малых величин.

ПВА является промежуточным продуктом переработки вольфрамовых руд и концентратов, и мировые потоки потребления этих товаров практически тождественны (с небольшими различиями в рейтингах лидеров спроса). Абсолютным лидером потребления ПВА остается Китай, перерабатывавший до 100 тыс. т (81 % мирового спроса) в 2018 г.

В потреблении вторичных сырьевых вольфрамовых отходов также лидирует Китай с наращиванием объемов их использования до 25 тыс. т (81 % мирового спроса) в 2019 г.

Цены на вольфрамовое сырье длительный период (до 2004 г.) испытывали обычное инфляционное увеличение (до 1 % отн/год), за исключением локальных всплесков повышения их цен в период роста потребления вольфрамовых продуктов в 1952–1956 гг. и в кризисный период после отмены золотого обеспечения доллара США в 1977–1981 гг. В 2004–2008 гг. начался значительное увеличение цен на все вольфрамовые продукты в результате бурного роста экономики Китая, сопровождавшегося резким увеличением их национального потребления, после чего наблюдается стабилизация уровня цен вольфрамовых продуктов на достигнутых высоких значениях. Были и локальные периоды просадки цен одновременно для всех вольфрамовых продуктов – в 2009–2010 гг.

(последствия всемирного финансового кризиса) и в 2015–2016 гг. (отклик на временное избыточное предложение вольфрамовых продуктов, в первую очередь из Китая). Цены на вольфрамовое сырье в 2020 г.: для вольфрамового концентрата – 29,35 USD/кг W (10,1 USD/кг концентрата в физическом весе), для ПБА – 17,6 USD/кг, для скрапа и отходов вольфрама – 17,9 USD/кг.

Динамика оцененной стоимости первичного вольфрамового концентрата в длительном периоде – 1930–2020 гг. – конформна ценовым показателям с периодами повышения в 1952–1956 гг. (до 289 млн USD/год), в 1973–1985 гг. (до 1,4 млрд USD/год) и в 2004–2020 гг. (до 2,0 млрд USD/год), при этом ценовый фактор является определяющим в формировании величины стоимости вольфрамового сырья. Стоимость вторичных утилизированных вольфрамовых отходов в 1970–1990-х гг. была невелика (12–15 млн USD/год), но начиная с 1999 г. (22 млн USD) она начинает увеличиваться вплоть до 769 млн USD в 2011 г. и остается на высоком уровне до настоящего времени. Налицо тенденция роста востребованности утилизации все больших объемов вольфрамовых отходов.

В динамике изменений стоимости международной торговли сырьевыми вольфрамовыми продуктами отмечаются те же самые периоды изменений: подъем в 1970–1980-е гг. (до 763 млн USD в 1981 г.), спад в 1990-е гг. (до 99 млн USD в 1999 г.) и рост в 2000–2010-е гг. (до 919 млн USD в 2014 г.). Отличие – высокая доля стоимости ПБА (до 66 % от стоимости вольфрамового сырья) после его появления на мировом рынке в 1988 г. и рост его стоимости (и ее долей рынка) в международной торговле вольфрамовыми отходами (до максимума в 326 млн USD в 2013 г. и до 56 % в 2020 г.).

В 1990-х гг. рынок мировой торговли вольфрамовыми продуктами перестает быть сырьевым (в 1990 г.

– по стоимости, а в 1994 г. – по физическим объемам продаж в пересчете на 100 % W), в нем начинают преобладать конечные вольфрамовые товары.

В целом Китай доминирует в мировом производстве, переработке и потреблении сырьевых вольфрамовых продуктов, поэтому его торговая политика по сдерживанию (квотированию) экспорта этих товаров, по сути дела, определяет динамику мирового рынка вольфрамового сырья. Китай в международной торговле изменил стратегию экспорта сырья на его импорт, причем став при этом также лидером импортирования вольфрамовых концентратов. Другие промышленно развитые страны – потребители вольфрамового сырья – США, Германия, Британия, Франция, Япония и Южная Корея – стали критически зависимыми от импорта вольфрамовых сырьевых продуктов (доля импорта свыше 50 % от потребления) и будут продолжать оставаться такими в обозримом будущем.

Политические противостояния в мире накладываяют свое влияние и на рынок сырьевых вольфрамовых продуктов. Коллегией Евразийской экономической комиссии в «Перечень возможного ограничения экспорта из стран-участников ЕАЭС» в 2016 г. включены отходы и лом вольфрама [27]. В России этот товарный продукт входит в «Перечень возможного ограничения экспорта ...» с 2007 г. [28], а с 08.03.2022 г. запрет российского экспорта отходов и лома вольфрама вступил в силу [29]. Возможны и другие ограничения международной торговли сырьевыми вольфрамовыми продуктами отдельными странами и их группами в результате давления политических санкций и их последствий.

*Статья написана в рамках выполнения гранта Российского научного фонда на 2022–2023 гг. по теме «Критические минеральные продукты в российском и мировом хозяйстве» (проект № 22-28-01742).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Analyzing the raw materials market and methods for processing tungsten concentrates to obtain competitive products / E.I. Gedgagov, A.D. Besser, V.Ya. Yanakov, V.P. Smolyarchuk // Theoretical foundations of chemical engineering. – 2009. – V. 43. – № 4. – P. 529–538.
2. Zafirov B. The strategic challenges on world tungsten market // International journal on information technologies and security. – 2010. – № 3. – P. 69–80.
3. Werner A.B.T., Sinclair W.D., Amey E.B. International strategic mineral issues summary report. Tungsten. U.S. Geological Survey. – 2014. – 86 p. URL: <https://www.usgs.gov/publications/international-strategic-mineral-issues-summary-report-tungsten> (дата обращения: 09.09.2022).
4. Global tungsten demand and supply forecast / J. Dvořáček, R. Soušedíková, T. Vrátný, Z. Jureková // Archives of mining sciences. – 2017. – V. 62. – № 1. – P. 3–12.
5. Mapping the global flow of tungsten to identify key material efficiency and supply security opportunities / D.R. Leal-Ayala, J.M. Allwood, E. Petavratzi, T.J. Brown, G. Gunn // Resources, conservation and recycling. – 2015. – V. 103. – P. 19–28. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.07.003.
6. International market power analysis of China's tungsten export market – from the perspective of tungsten export policies / X. Zhu, X. Li, H. Zhang, J. Huang // Resources policy. – 2019. – V. 61. – P. 643–652. DOI: 10.1016/j.resourpol.2018.11.005.
7. Клячко Л.И., Лейтман М.С. Лом вольфрама: технология вторичной переработки и российский рынок // Цветные металлы. – 2005. – № 3. – С. 101–104.
8. Shedd K.B. Tungsten recycling in the United States in 2000. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. – 2011. – 26 p. URL: [https://pubs.usgs.gov/circ/circ1196-R/pdf/circular\\_1196-R.pdf](https://pubs.usgs.gov/circ/circ1196-R/pdf/circular_1196-R.pdf) (дата обращения 09.09.2022).
9. Recycling of secondary tungsten resources / D. Mishra, S. Sinha, K.K. Sahu, A. Agrawal, R. Kumar // Transactions of the Indian institute of metals. – 2017. – V. 70. – № 2. – P. 479–485. DOI: 10.1007/s12666-016-1003-8.
10. Геологическая служба Британии (BGS). URL: <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/> (дата обращения 09.09.2022).
11. Геологическая служба США (U.S. Geological Survey). URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/index.html#mcs> (дата обращения 09.09.2022).
12. TrendEconomy. URL: <https://trendeconomy.ru/> (дата обращения: 09.09.2022).
13. Исследовательская группа «ИнфоМайн». URL: <https://infomine.ru/> (дата обращения 09.09.2022).
14. A world of information. UNdata. URL: <https://data.un.org/> (дата обращения: 09.09.2022).
15. Государственные доклады «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации». 2000–2020 гг. URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resurso\\_v\\_rossiyskoy\\_federatsii/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resurso_v_rossiyskoy_federatsii/) (дата обращения 09.09.2022).



16. Данные по таможенной статистике внешней торговли Российской Федерации. Федеральная таможенная служба. URL: [stat.customs.gov.ru/analysis](http://stat.customs.gov.ru/analysis) (дата обращения 09.09.2022).
17. Минеральное сырье. Вольфрам. Справочник / Б.С. Чернов, С.В. Белов, Л.С. Бронническая, Т.И. Гетманская, А.А. Бурмистров. – М.: Геоинформмарк, 1998. – 37 с.
18. Review of tungsten resource reserves, tungsten concentrate production and tungsten beneficiation technology in China / X. Wang, W.-Q. Qin, F. Jiao, L.-Y. Dong, J.-G. Guo, J. Zhang, C.-R. Yang // Transactions of nonferrous metals society of China. – 2022. – V. 32. – № 7. – P. 2318–2338. DOI: 10.1016/S1003-6326(22)65950-8.
19. Efficient extraction of tungsten, calcium, and phosphorus from low-grade scheelite concentrate / J. Li, J. Yang, Z. Zhao, X. Chen, X. Liu, L. He, F. Sun // Minerals engineering. – 2022. – V. 181. – Article No 107462. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107462.
20. Хатьков В.Ю., Боярко Г.Ю. Современное состояние вольфрамовой промышленности России // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 124–137. DOI: 10.18799/24131830/2019/2/114.
21. Lassner E. From tungsten concentrates and scrap to highly pure ammonium paratungstate (APT) // International journal of refractory metals and hard materials. – 1995. – V. 13. – № 1–3. – P. 35–44. DOI: 10.1016/0263-4368(95)00002-X.
22. Dan N., Li J. Preparation technology status and development prospect of high purity ammonium paratungstate product [高纯仲钨酸铵产品制备工艺现状及发展前景] // Fenmo yejin cailiao kexue yu gongcheng [Materials science and engineering of powder metallurgy]. – 2020. – V. 25. – № 5. – P. 363–368.
23. Recycling of tungsten carbide scrap metal: a review of recycling methods and future prospects / A. Shemi, A. Magumise, S. Ndlovu, N. Sacks // Minerals engineering. – 2018. – V. 122. – P. 195–205. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.03.036.
24. Studies on the preparation of pure ammonium para tungstate from tungsten alloy scrap / S. Hairunnisha, G.K. Sendil, J.P. Rethinaraj, G.N. Srinivasan, P. Adaikkalam, S. Kulandaisamy // Hydrometallurgy. – 2007. – V. 85. – № 2–4. – P. 67–71. DOI: 10.1016/j.hydromet.2006.08.002.
25. Xi-Jie C., Li-Qiong J. China raised the first batch production quota over rare-earths and tungsten in 2021 // China geology. – 2021. – V. 4. – № 1. – P. 193–194. DOI: 10.31035/cg2021031.
26. Focus on some aspects of market price trends for tungsten / J. Dvořáček, R. Sousediková, A. Krzemien, A.S. Sanchez // Acta montanistica Slovaca. – 2017. – V. 22. – № 2. – P. 126–135.
27. Перечень товаров, которые являются существенно важными для внутреннего рынка Евразийского экономического союза и в отношении которых в исключительных случаях могут быть введены временные запреты или количественные ограничения экспорта / Утв. Решением Коллегии Евразийской экономической комиссии от 26.07.2016 N 83 (ред. от 31.03.2020).
28. Перечень товаров, являющихся существенно важными для внутреннего рынка Российской Федерации, в отношении которых в исключительных случаях могут быть установлены временные ограничения или запреты экспорта / Утв. Постановлением Правительства РФ от 15.12.2007 N 877 (ред. от 06.08.2022) // Собрание законодательства РФ, 24.12.2007, N 52, ст. 6461.
29. Постановление Правительства РФ от 09.03.2022 N 313 (ред. от 27.08.2022). «О мерах по реализации Указа Президента Российской Федерации от 8 марта 2022 г. N 100» // Собрание законодательства РФ, 21.03.2022, N 12, ст. 1819.

Поступила: 31.10.2022 г.

Прошла рецензирование: 20.03.2023 г.

#### Информация об авторе

**Боярко Г.Ю.**, доктор экономических наук, кандидат геолого-минералогических наук, профессор, отделение нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDC 339.13:669.273.3:669.273.6

## OVERVIEW OF THE GLOBAL TUNGSTEN MARKET. PART 2. COMMODITY FLOWS OF RAW TUNGSTEN PRODUCTS

Grigory Yu. Boyarko,  
gub@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the need to study the problems of quite volatile world market of tungsten raw materials.

**Objective:** to study the dynamics of global commodity flows (production, import, export, consumption) of raw tungsten products (tungsten ores and concentrates, ammonium paratungstate, tungsten waste and scrap); to assess the criticality of the world market of raw tungsten products.

**Methods:** statistical, graphical, logical.

**Results.** The raw tungsten product global market is very complex. The world production of primary tungsten raw materials increased from 4 to 7 kt 100 % W/year in 1913–1915, from 75 to 90 kt 100 % W/year in 2011–2020 with a growth rate of +2,9 %/year. Utilization of secondary tungsten raw materials in the world increased from 2–3 kt 100 % W/year in 1970s to 14–23 kt 100 % W/year in 2008–2020 with an increase rate of +4,3 %/year. The share of global utilization of tungsten waste from the amount of primary and secondary tungsten raw materials increased from 5–6 % in 1970s to 21 % in 2019. In 1970–1980, there was a period of usual low-growth global consumption of tungsten products with the growth rate of tungsten raw materials demand for +3,4 %/year. There was a strong decrease in demand for tungsten products (–6,9 %/year) in the military sphere (the end of the Cold War) and priority shift in the trade of tungsten raw material commodities (increase in the role of ammonium paratungstate trade), reducing the role of Russia in the tungsten market (the consequences of the stagnation of the Russian economy, primarily metalworking) in the 1990s. In the 2000–2010s, there was a rapid growth in global demand for final tungsten commodity products and, accordingly, global demand and supply of tungsten raw materials, with an increase in demand of +6,4 %/year. At the same time, there is a trend of decreasing share in world trade in tungsten raw materials from the amount of extracted primary and recycled secondary raw materials by volume and cost, respectively, 39 and 47 % in 1970 to 21 and 27 % in 2020. The share of raw materials in world trade in tungsten products decreased from 70–80 % by volume and 60–70 % of the cost in 1970–1980s, respectively, up to 42–55 and 15–20 % in the 2010s. China dominates in the global production, processing and consumption of raw tungsten products, therefore, its trade policy to restrain (quota) exports of these goods determines the dynamics of the world market of tungsten raw materials. In international trade, China has changed the strategy of exporting raw materials to importing them, while becoming the leader in importing tungsten concentrates. Other industrialized countries – consumers of tungsten raw materials – the USA, Germany, Britain, France, Japan and South Korea – have become critically dependent on tungsten raw material imports (the share of imports is over 50 % of consumption) and will remain so in the foreseeable future.

### Key words:

Tungsten ores and concentrates, ammonium paratungstate, tungsten waste, production, export, import, consumption, pricing, cost.

The article was written as part of the grant from the Russian Science Foundation for 2022–2023 on the topic «Critical Mineral Products in the Russian and World Economy» (project no. 22-28-01742).

### REFERENCES

- Gedgagov E.I., Besser A.D., Yanakov V.Ya., Smolyarchuk V.P. Analyzing the raw materials market and methods for processing tungsten concentrates to obtain competitive products. *Theoretical foundations of chemical engineering*, 2009, vol. 43, no. 4, pp. 529–538.
- Zafirov B. The strategic challenges on world tungsten market. *International journal on information technologies and security*, 2010, no. 3, pp. 69–80.
- Werner A.B.T., Sinclair W.D., Amey E.B. *International strategic mineral issues summary report. Tungsten*. U.S. Geological Survey, 2014, 86 p. Available at: <https://www.usgs.gov/publications/international-strategic-mineral-issues-summary-report-tungsten> (accessed 9 September 2022).
- Dvořáček J., Sousedíková R., Vrátný T., Jureková Z. Global tungsten demand and supply forecast. *Archives of Mining Sciences*, 2017, vol. 62, no. 1, pp. 3–12.
- Leal-Ayala D.R., Allwood J.M., Petavratzi E., Brown T.J., Gunn G. Mapping the global flow of tungsten to identify key material efficiency and supply security opportunities. *Resources, conservation and recycling*, 2015, vol. 103, pp. 19–28. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.07.003.
- Zhu X., Li X., Zhang H., Huang J. International market power analysis of China's tungsten export market – from the perspective of tungsten export policies. *Resources policy*, 2019, vol. 61, pp. 643–652. DOI: 10.1016/j.resourpol.2018.11.005.
- Klyachko L.I., Leitman M.S. Lom volframa: tekhnologiya vtorichnoy pererabotki i rossiyskiy rynek [Tungsten scrap: technology of secondary processing and Russian market]. *Tsvetnyye metally*, 2005, no. 3, pp. 101–104.
- Shedd K.B. *Tungsten recycling in the United States in 2000*. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2011. 26 p. Available at: [https://pubs.usgs.gov/circ/circ1196-R/pdf/circular\\_1196-R.pdf](https://pubs.usgs.gov/circ/circ1196-R/pdf/circular_1196-R.pdf) (accessed 9 September 2022).
- Mishra D., Sinha S., Sahu K.K., Agrawal A., Kumar R. Recycling of secondary tungsten resources. *Transactions of the Indian institute of metals*, 2017, vol. 70, no. 2, pp. 479–485. DOI: 10.1007/s12666-016-1003-8.
- British Geological Survey*. Available at: <https://www2.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/> (accessed 9 September 2022).
- U.S. Geological Survey*. Available at: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/tin/index.html#mcs> (accessed 9 September 2022).
- TrendEconomy*. Available at: <https://trendeconomy.ru/> (accessed 9 September 2022).
- Infomine Research Group*. Available at: <https://infomine.ru/> (accessed 9 September 2022).
- A world of information. UNdata*. Available at: <https://data.un.org/> (accessed 9 September 2022).
- Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ispolzovanii mineralno-syrevykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2000–2020 godu»* [State report «On the state and use of mineral resources of the

- Russian Federation in 2000–2020». Available at: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) (accessed 9 September 2022).
16. *Data on customs statistics of foreign trade of the Russian Federation*. Federal State Statistics Service. Available at: [stat.customs.gov.ru/analysis](http://stat.customs.gov.ru/analysis) (accessed 9 September 2022).
17. Chernov B.S., Belov S.V., Bronnickaya L.S., Getmanskaya T.I., Burmistrov A.A. *Mineralnoe syrye. Volfram. Spravochnik* [Mineral raw materials. Tungsten. Guide]. Moscow, Geoinformmark Publ., 1998. 37 p.
18. Wang X., Qin W.-Q., Jiao F., Dong L.-Y., Guo J.-G., Zhang J., Yang C.-R. Review of tungsten resource reserves, tungsten concentrate production and tungsten beneficiation technology in China. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 2022, vol. 32, no. 7, pp. 2318–2338. DOI: 10.1016/S1003-6326(22)65950-8.
19. Li J., Yang J., Zhao Z., Chen X., Liu X., He L., Sun F. Efficient extraction of tungsten, calcium, and phosphorus from low-grade scheelite concentrate. *Minerals engineering*, 2022, vol. 181, article no. 107462. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107462.
20. Khatkov V.Yu., Boyarko G.Yu. Current state of tungsten industry in Russia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 124–137. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2019/2/114.
21. Lassner E. From tungsten concentrates and scrap to highly pure ammonium paratungstate (APT). *International journal of refractory metals and hard materials*, 1995, vol. 13, no. 1–3, pp. 35–44. DOI: 10.1016/0263-4368(95)00002-X.
22. Dan N., Li J. Preparation technology status and development prospect of high purity ammonium paratungstate product [高纯仲钨酸铵产品制备工艺现状及发展前景]. *Fenmo yeyin cailiao kexue yu gongcheng* [Materials science and engineering of powder metallurgy], 2020, vol. 25, no. 5, pp. 363–368.
23. Shemi A., Magumise A., Ndlovu S., Sacks N. Recycling of tungsten carbide scrap metal: A review of recycling methods and future prospects. *Minerals engineering*, 2018, vol. 122, pp. 195–205. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.03.036.
24. Hairunnisha S., Sendil G.K., Rethinaraj J.P., Srinivasan G.N., Adaikkalam P., Kulandaisamy S. Studies on the preparation of pure ammonium para tungstate from tungsten alloy scrap. *Hydro-metallurgy*, 2007, vol. 85, no. 2–4, pp. 67–71. DOI: 10.1016/j.hydromet.2006.08.002.
25. Xi-Jie C., Li-Qiong J. China raised the first batch production quota over rare-earths and tungsten in 2021. *China geology*, 2021, vol. 4, no. 1, pp. 193–194. DOI: 10.31035/cg2021031.
26. Dvořáček J., Sousedíková R., Krzemien A., Sanchez A.S. Focus on some aspects of market price trends for tungsten. *Acta montanistica Slovaca*, 2017, vol. 22, no. 2, pp. 126–135.
27. *Reshenie Kollegii Evraziyskoy ekonomicheskoy komissii. Perechen tovarov, kotorye yavlyayutsya sushchestvenno vazhnymi dlya vnutrennego rynka Evraziyskogo ekonomicheskogo soyuza i v otnoshenii kotorykh v isklyuchitelnykh sluchayakh mogut byt vvedeny vremennyye zaprety ili kolichestvennyye ogranicheniya eksporta* [The list of goods that are essential for the internal market of the Eurasian Economic Union and in respect of which, in exceptional cases, temporary bans or quantitative export restrictions may be imposed]. Approved by the Decision of the Board of the Eurasian Economic Commission of 07/26/2016, no 83 (ed. of 03/31/2020).
28. *Postanovlenie Pravitelstva RF. Perechen tovarov, yavlyayushchikhsya sushchestvenno vazhnymi dlya vnutrennego rynka Rossiyskoy Federatsii, v otnoshenii kotorykh v isklyuchitelnykh sluchayakh mogut byt ustanovleny vremennyye ogranicheniya ili zaprety eksporta* [The list of goods that are essential for the domestic market of the Russian Federation, in respect of which, in exceptional cases, temporary export restrictions or prohibitions may be established]. Resolution of the Government of the Russian Federation of 12/15/2007, no 877 (ed. of 08/06/2022). Collection of Legislation of the Russian Federation, 12/24/2007, no 52, article 6461.
29. *Postanovlenie Pravitelstva RF. «O merakh po realizatsii Ukaza Prezidenta Rossiyskoy Federatsii ot 8 marta 2022 g. no 100»* [Resolution of the Government of the Russian Federation of 03/09/2022, no 313 (ed. of 08/27/2022). «On measures to implement the Decree of the President of the Russian Federation of March 8, 2022, no 100»]. Collection of Legislation of the Russian Federation, 03/21/2022, no 12, article 1819.

Received: 31 October 2022.

Reviewed: 20 March 2023.

#### Information about the author

**Grigory Yu. Boyarko**, Dr. Sc., Cand. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 550.834

## ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ДЛЯ ПРОГНОЗА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

Кочегуров Александр Иванович<sup>1</sup>,  
kaicc@tpu.ru

Кочегурова Елена Алексеевна<sup>1</sup>,  
kocheg@mail.ru

Орлов Олег Викторович<sup>1</sup>,  
orloff234@gmail.ru

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

**Актуальность.** Одними из основных задач при прогнозировании геологического разреза являются задачи определения типа разреза и картирование типов по изучаемой площади, а также оценки поглощающих и дисперсионных свойств геологических сред. Для решения данных задач в настоящее время широко применяются специализированные программно-алгоритмические комплексы обработки и интерпретации сейсмических материалов. В большинстве современных комплексов для прогноза геологического разреза используется информация, извлекаемая из кинематических и динамических характеристик сейсмических волн. На основе полученной информации и данных о геофизическом исследовании скважин формируются представления о вещественном составе осадков, наличии продуктивных толщ на исследуемой площади. Такой подход позволил в ряде регионов России, в том числе в Западной Сибири, получить интересные и важные результаты, связанные с обнаружением продуктивных осадочных толщ и оценкой их нефтегазоносности, что было подтверждено практикой. В тоже время результаты практической деятельности показали, что при проведении исследований многих площадей присутствуют области, где процент выделения ложных аномалий геологических сред и принятия ошибочных решений при прогнозе еще достаточно велик. Это связано в том числе с тем, что при анализе регистрируемого сейсмического поля для прогноза геологического разреза используются в основном энергетические характеристики отраженных волн, а изменения фазовых спектров практически не учитываются. Таким образом, комплексное использование характеристик отраженных сейсмических волн (амплитудных и фазовых) при прогнозе геологического разреза является весьма актуальной задачей.

**Цель:** на основе метода фазочастотной деконволюции провести фазоэнергетический анализ для различных моделей сейсмических полей для прогноза геологического разреза.

**Методы:** вычислительный эксперимент, обратная фильтрация, дискретное преобразование Фурье.

**Результаты.** Разработан алгоритм фазоэнергетического анализа сейсмических волн, в основу которого положены результаты фазочастотной деконволюции. Проведены исследования алгоритма на различных моделях геологических сред, построены фазоэнергетические разрезы, позволяющие выделять зоны с аномально низкими значениями энергии для последующей диагностики нефтегазоносности. Приведен пример построения фазоэнергетического разреза по реальным данным в интервале верхнеюрских отложений.

### Ключевые слова:

прогноз геологического разреза, фазочастотная деконволюция, фазоэнергетический анализ, обратный фильтр сжатия, модели геологических сред.

### Введение

Современный этап поиска нефти и газа требует проведения полного цикла разведочных работ в слабо исследованных территориях. При этом даже в тех районах, где расположены промышленные месторождения, а также на площади самих месторождений, еще весьма актуальна задача, связанная с построением пространственной модели природных нефтяных резервуаров. Особенно интересны модели резервуаров с латеральными изменениями фильтрационно-емкостных свойств геологической среды. Решение таких задач в том числе связано с построением цифровых двойников нефтяных месторождений на основе применения эффективных методов прогнозирования геологического разреза (ПГР).

В общем случае все методы ПГР в зависимости от цели решаемых задач условно можно разделить на две группы: методы, направленные на детальное раз-

деление слоистых толщ для изучения структуры геологического разреза, и методы, используемые для определения петрофизических параметров осадочных толщ, прогноза на их основе расположения и нефтегазоносности коллекторов. Для детального разделения слоистых толщ в настоящее время широко используются методы деконволюции. Особенно эти методы необходимы при изучении тонкослоистых геологических сред. В таких средах из-за малой мощности слоев (20–30 м) отраженные волны создают интерференционную картину, и выделить границы отдельных отражений на сейсмическом разрезе становится невозможно. Еще более усложняется ситуация из-за наличия нерегулярных помех, образующих аддитивное шумовое поле. Поэтому при исследовании тонкослоистых сред для получения разрезов с высоким разрешением предложено большое количество алгоритмов сжатия сигналов, основанных на методах деконволюции [1–10].

В целом деконволюция является необходимой составляющей любого графа обработки сейсмических данных и направлена на увеличение временного разрешения сигналов путем сжатия сейсмического импульса. Результаты деконволюции существенно образом влияют на возможность корреляции отраженных волн и качество дальнейших глубинных построений, включая прогноз геологического разреза. С точки зрения математики деконволюция является операцией обратной фильтрации свертки сигнала с импульсной последовательностью. Здесь для синтеза частотной характеристики обратного фильтра требуется знать полный комплексный спектр сигнала [11]. Однако в современных программно-алгоритмических комплексах обработки сейсмической информации таких мировых лидеров, как ЦГЭ в России, Schlumberger в США и др., используются алгоритмы деконволюции (слепая, импульсная, предсказывающая деконволюция и т. д.), основанные на анализе амплитудно-частотных характеристик отраженных волн. В отношении фазовых спектров принимается предположение, что они являются нуль-фазовыми или минимально фазовыми функциями [12–16]. К сожалению, есть только несколько работ, где авторы используют фазовые соотношения при синтезе обратных фильтров. Однако даже здесь в качестве фаз используют числовые константы, рассчитанные ранее по большому объему экспериментальных данных [17].

В то же время существует очень интересный подход, связанный с применением статистического алгоритма корректировки фазового спектра, предложенный и достаточно хорошо формализованный группой ученых (Д.Б. Фиников и др.) и получивший название «фазовая деконволюция». Суть данного подхода заключается в приведении сигнала к нуль-фазовому виду без изменения его амплитудного спектра [18]. Разработанный алгоритм фазовой деконволюции прошел достаточную апробацию на реальных данных, показал хорошие результаты на ряде площадей и применяется в настоящее время в практике обработки и интерпретации сейсмических данных. Однако и данный подход имеет ряд минусов. Так, для его реализации требуется проводить весьма непростую процедуру цифровой фильтрации – применение симметризирующих фильтров, кроме того, в ряде случаев возникает неопределенность в постоянной составляющей фазового спектра, которая может быть скорректирована только с учетом скважинных данных, и то не всегда. Поэтому далеко не всегда методы деконволюции дают возможность с необходимой точностью проследить границы отражения, так как за счет поглощения и дисперсии геологической среды форма отраженных волн претерпевает изменения, что естественно приводит к изменению спектра сигналов и требует формирования новой частотной характеристики фильтра сжатия. Для построения частотной характеристики фильтра сжатия в поглощающих средах целесообразно наряду с энергетическими спектрами сейсмических сигналов использовать и их фазовые спектры, стационарная область которых несет информацию о местоположении отражающих границ. Таким образом, комплексное использование ампли-

тудных и фазовых составляющих спектра отраженных волн в фильтрах сжатия (фазочастотная деконволюция) имеет большие перспективы, а сами методы фазочастотной деконволюции лежат в основе проведения фазоэнергетического анализа, который позволяет увеличить достоверность ПГР.

#### Постановка задачи

Многочисленные исследования на моделях и анализ реальных сейсмических разрезов общей глубинной точки (ОГТ) для сред с известным флюидонасыщением показали, что достаточно часто фазовые спектры коэффициента отражения от подошвы или кровли вмещающей толщи  $\varphi_k(f)$  существенно зависят от наличия или отсутствия углеводородов в данной толще. Так, например, фазочастотные характеристики волн, отраженных от кровли или подошвы продуктивной толщи, имеют следующие особенности [19]:

- в случае отсутствия углеводородов в продуктивной толще фазочастотная характеристика в области несущей частоты сигнала  $\varphi_k(f_0)$  близка к величине  $0+2\pi k$ ,  $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$
- в случае присутствия углеводородов в продуктивной толще  $\varphi_k(f_0) \approx \pi/2 + 2\pi k$ ,  $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$
- в случае водонасыщенной песчаной толщи величина  $\varphi_k(f_0)$  занимает промежуточное положение ( $0 < \varphi_k(f_0) \bmod 2\pi k < \pi/2$ ).

Обратимся теперь к методу фазочастотной деконволюции, рассмотренному подробно в [20], функция качества которого формируется взвешенной суммой значений косинусов мгновенных фазовых спектров. Тогда, исходя из выделенных особенностей фазочастотной характеристики (ФЧХ) продуктивной толщи, приведенных выше, можно констатировать:

- в случае отсутствия углеводородов в продуктивной толще величина  $|\cos(\varphi)|$  максимальна. Амплитуда экстремума функции качества (ФК), соответствующего данному отражению, будет иметь максимальное значение;
- при наличии залежи углеводородов в продуктивной толще величина  $|\cos(\varphi)|$  минимальна. Амплитуда экстремума ФК, соответствующего данному отражению, будет иметь минимальное значение;
- для водонасыщенной песчаной толщи величина  $|\cos(\varphi)|$  занимает промежуточное положение между 0 и 1. Амплитуда соответствующего экстремума ФК при этом будет также принимать значение в промежутке между минимумом и максимумом.

Таким образом, зоны с аномально низкой амплитудой функции качества могут являться прогнозными на наличие залежи углеводородов. Требуется на основе выделенной аномалии функции качества разработать алгоритм фазоэнергетического анализа (ФЭА) сейсмических волн, провести его исследования на моделях и реальных данных. Для построения алгоритма использовался метод фазочастотной деконволюции [20].

#### Фазоэнергетический анализ сейсмических волн

Как показано выше, для решения задач прогноза нефтегазоносности можно непосредственно использовать

функцию качества  $L(t)$ , формируемую при фазочастотной деконволюции. Тогда, с целью расчленения тонкослойной структуры геологической среды и подавления шумов, для построения алгоритма фазоэнергетического анализа необходимо предварительно вычислить функцию:

$$G(t) = \sum_{k=1}^M L_k(t) = \sum_{k=1}^M \sum_{i=0}^{n-1} w_k(f_i) \cos[\varphi(f_i, t)], \quad (1)$$

которая является суммой функций качества  $L_k(t)$ , получаемых при фазочастотной деконволюции [20]. Функция  $G(t)$  определяется для всего выбранного фрагмента разреза ОГТ, т. е. формируется совокупность значений функций  $G(t, x)$ , определенных на интервале  $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$ ,  $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$ . Данная функция характеризует пространственно-временной разрез высокой разрешенности. Основными назначениями данного разреза являются:

- выделение пространственно-временных зон аномально низких значений амплитуд, соответствующих прогнозным зонам;
- разделение аномальных зон по степени интенсивности;
- наглядное представление структурно-литологического состава разреза.

Следует отметить, что непосредственное использование таких разрезов с целью выделения прогнозных зон вызывает определенные затруднения, так как каждая трасса разреза имеет вид квазипериодической последовательности положительных и отрицательных амплитуд. Поэтому производится дополнительная обработка разрезов, заключающаяся в вычислении энергии функции  $G(t, x)$ , осредненной на некоторой базе наблюдения  $x_b, t_b$ :

$$E(t, x) = \frac{1}{x_b t_b} \sum_{x'=\frac{x-x_b}{2}}^{x+\frac{x_b}{2}} \sum_{t'=\frac{t-t_b}{2}}^{t+\frac{t_b}{2}} G^2(t', x'). \quad (2)$$

При этом размеры базы наблюдения выбираются в зависимости от частотного состава сейсмических данных и решаемых задач.

В результате формируется пространственно-временная функция энергий – фазоэнергетическая функция. Результат визуализации данной функции в цветокодированном виде представляет фазоэнергетический разрез (ФЭР). Для задания уровней цветкодирования используются результаты испытаний скважин. Анализ функции  $E(t, x)$ , проведенный в рамках принятой информационной модели среды, показывает, что она, как и функция качества, непосредственно связана с петрофизическими свойствами осадочных толщ. При этом появление аномальных значений поглощения и акустических свойств среды в области залежи приводит к появлению аномалий и в поведении функции  $E(t, x)$ . Таким образом, значения функции  $E(t, x)$  могут использоваться как прогнозные параметры при выделении залежей углеводородов.

Приведем отдельные результаты, полученные при исследовании фазоэнергетического анализа на некоторых моделях слоистых сред, параметры которых заданы применительно к условиям верхнеюрской толщи.

#### Результаты вычислительного эксперимента на моделях

Первый этап исследования эффективности фазоэнергетического анализа заключается в построении

моделей сейсмических волновых полей. Каждая модель соответствует различным геологическим средам, которые характеризуются своей скоростью, плотностью и параметром поглощения. Данные параметры изменяются в зависимости от литологического состава среды, степени уплотнения и ряда других факторов и выбирались близкими к параметрам верхнеюрского продуктивного горизонта Томской области.

Для исследования было выбрано 5 моделей:

- модель 1-2: слева – водонасыщенный песчаник, справа – нефтенасыщенный песчаник;
- модель 1-3: слева – глинизованный песчаник, справа – нефтенасыщенный песчаник;
- модель 2-3: слева – глинизованный песчаник, справа – водонасыщенный песчаник;
- модель 2-4: слева – водонасыщенный песчаник, справа – газонасыщенный песчаник;
- модель 3-4: слева – глинизованный песчаник, справа – газонасыщенный песчаник.

При этом для всех моделей в качестве покрывающей толщи принимались аргиллиты Баженовской свиты, а в качестве подстилающей свиты – аргиллиты. Численные значения параметров моделей выбирались исходя из реальных данных. В качестве примера в таблице приведены параметры модели 1. Здесь  $\beta$  – коэффициент поглощения;  $V$  – скорость среды,  $\rho$  – плотность среды,  $h$  – мощность толщи. Далее для всех моделей рассчитывались сейсмические характеристики: скорость, плотность и коэффициент поглощения. Изменения сейсмических характеристик продуктивной толщи вдоль профиля наблюдения для модели 1-2 приведены на рис. 1. Для построения моделей волновых полей использовался импульс с колокольной огибающей с параметрами: основная частота  $f_0=30$  Гц, коэффициент затухания  $b=45$ . Полученные сейсмические волновые поля приведены на рис. 2.

**Таблица.** Численные значения параметров модели 1  
**Table.** Numerical values of model 1 parameters

Модель 1/Model 1	$V$ , м/с (m/s)	$\rho$ , г/см <sup>3</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	$\beta$ , с/м (s/m)	$h$ , м (m)
Верхний слой/Upper layer	2500	2,50	0,00002	200
Аргиллиты (Баженовская пачка) Mudstones (Bazhenov member)	2700	2,50	0,000015	20
Нефтенасыщенный песчаник Oil-saturated sandstone	3120	2,37	0,000073	20
Аргиллиты/Mudstones	3000	2,55	0,000015	10
	3100	2,60	0,000014	10
	3200	2,65	0,000013	10
	3100	2,55	0,000014	10
	3000	2,50	0,000015	10
Нижний слой/Bottom layer	3000	2,60	0,000015	¥

Далее для всех моделей рассчитывались сейсмические характеристики: скорость, плотность и коэффициент поглощения. Изменения сейсмических характеристик продуктивной толщи вдоль профиля наблюдения для модели 1-2 приведены на рис. 1.

Для построения моделей волновых полей использовался импульс с колокольной огибающей с параметрами: основная частота  $f_0=30$  Гц, коэффициент затухания  $b=45$ . Полученные сейсмические волновые поля приведены на рис. 2.

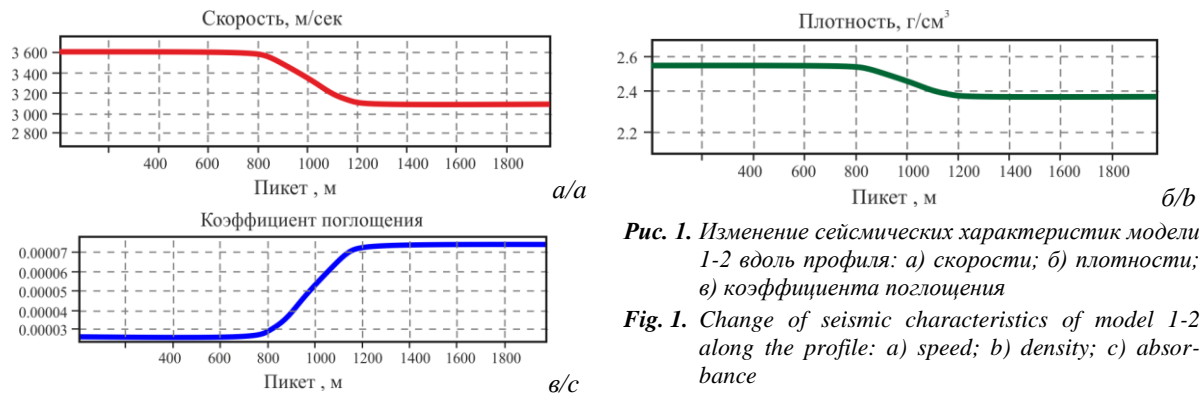


Рис. 1. Изменение сейсмических характеристик модели 1-2 вдоль профиля: а) скорости; б) плотности; в) коэффициента поглощения

Fig. 1. Change of seismic characteristics of model 1-2 along the profile: а) speed; б) density; в) absor-bance

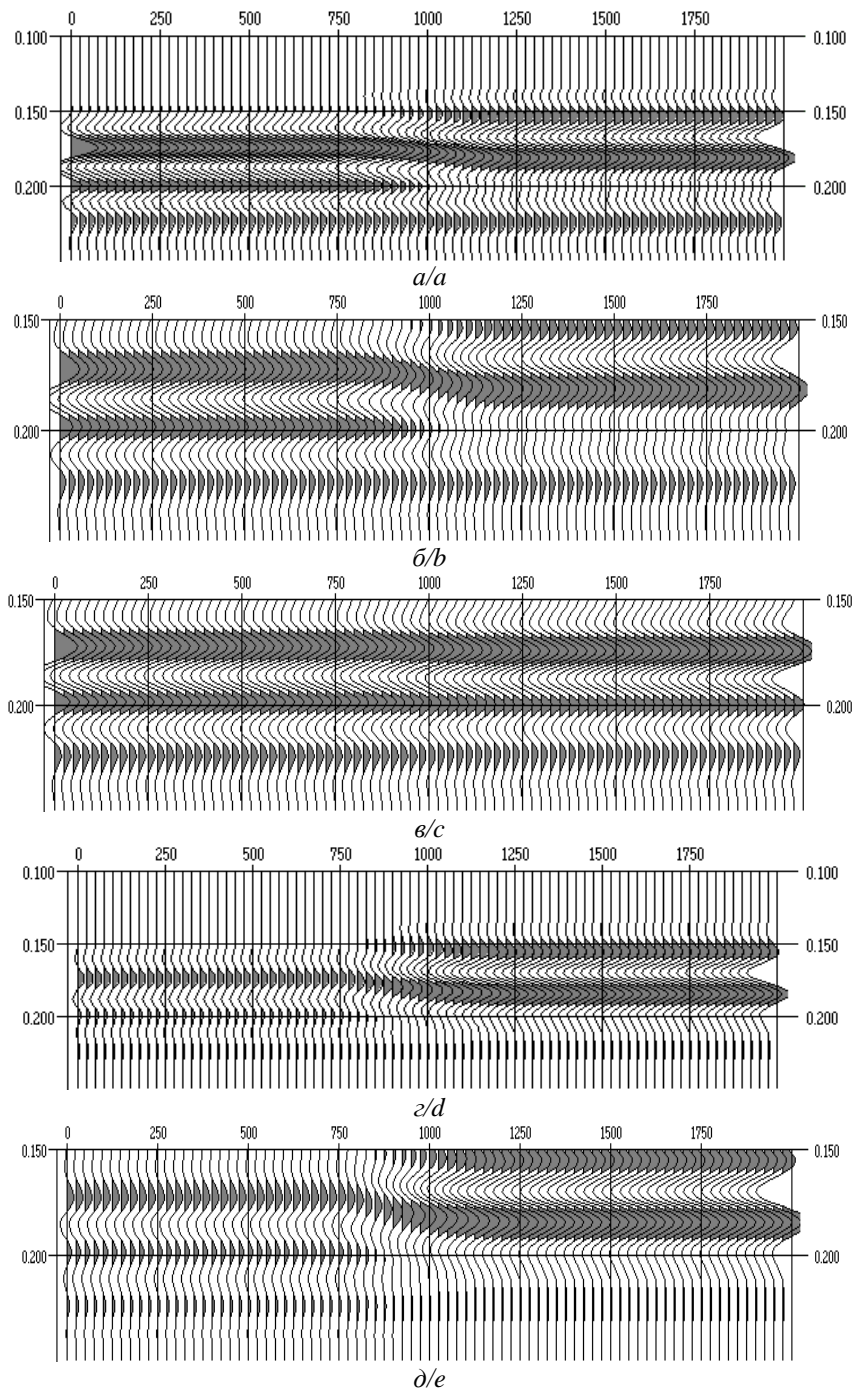
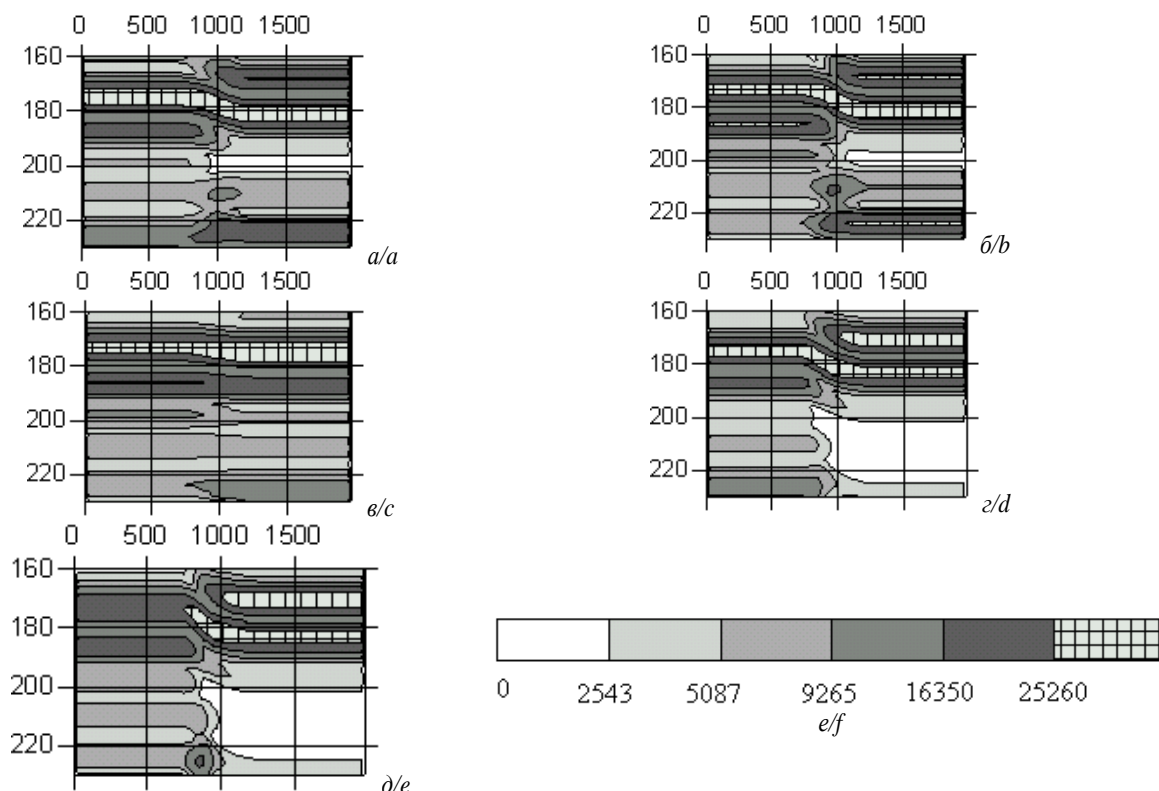


Рис. 2. Модели волновых полей: а) 1-2; б) 1-3; в) 2-3; г) 2-4; д) 3-4

Fig. 2. Wavefield models: а) 1-2; б) 1-3; в) 2-3; д) 2-4; е) 3-4





**Рис. 3.** Фазоэнергетические разрезы для исследуемых моделей сейсмических волновых полей в цветокодированном виде: а) модель 1-2 (слева – водонасыщенный песчаник, справа – нефтенасыщенный песчаник); б) модель 1-3 (слева – глинизованный песчаник, справа – нефтенасыщенный песчаник); в) модель 2-3 (слева – глинизованный песчаник, справа – водонасыщенный песчаник); г) модель 2-4 (слева – водонасыщенный песчаник, справа – газонасыщенный песчаник); д) модель 3-4 (слева – глинизованный песчаник, справа – газонасыщенный песчаник); е) шкала цветокодировки; цифрами обозначена амплитуда ФЭР

**Fig. 3.** Phase-energy sections for the studied models of seismic wave fields in color-coded form: а) model 1-2 (left – water-saturated sandstone, right – oil-saturated sandstone); б) model 1-3 (left – shaly sandstone, right – oil-saturated sandstone); в) model 2-3 (left – shaly sandstone, right – gas-saturated sandstone); г) model 2-4 (left – water-saturated sandstone, right – gas-saturated sandstone); д) model 2-3 (left – shaly sandstone, right – water-saturated sandstone); е) color scale; the numbers indicate the amplitude of the FER

Далее сгенерированные волновые поля использовались для получения фазоэнергетических разрезов. На этом этапе исследования сначала для сформированных моделей сейсмических волновых полей были вычислены пространственно-временные разрезы  $G(t, x)$ , полученные на основании выражения (1). При этом использовались следующие параметры: длительность окна прослеживания – 72 мс, 14 весовых функций с крутизной 0,8 ( $M=14$  в выражении (1)), центральная частота первого фильтра – 6 Гц, центральная частота последнего фильтра – 90 Гц.

Затем вычислялись энергетические характеристики (2), в результате чего были сформированы необходимые для анализа фазоэнергетические разрезы. Изображения фазоэнергетических разрезов в цветокодированном виде приведены на рис. 3. Из рис. 3, а, б, г, д видно, что области, соответствующие зонам с УВ, на фазоэнергетических разрезах имеют anomalously низкую амплитуду ФЭР и отображаются на цветокодированном разрезе в виде белых областей. В то же время в областях, соответствующих глинизованному песчанику и аргиллитам, наблюдаются наибольшие значения амплитуды ФЭР. В областях, соответствующих

водонасыщенному песчанику (рис. 3, а, в, г), амплитуды ФЭР имеют средние значения. Это полностью согласуется с результатами теоретических рассуждений, приведенных выше.

В целом можно сказать, что данные результаты свидетельствуют о значимых информационных возможностях ФЭА при решении задач ПГР, в том числе прогноза нефтегазоносности продуктивных толщ.

#### Фазоэнергетический анализ реальных сред

В качестве примера, иллюстрирующего эффективность предлагаемого подхода, на рис. 4 приведен фрагмент фазоэнергетического разреза [21] для верхнеюрских отложений в направлении линии Р2-ПВ (разведочная скважина – пункт взрыва, указанный выше скважины). На фрагменте разреза наблюдаются области с аномальными значениями фазоэнергетической функции (белые пятна) на расстояниях 500–700 м от устья скважины (рис. 4), что говорит о возможности выделения нефтегазоперспективных зон. Подтверждением сказанному является небольшой приток нефти, который был получен при испытании скважины Р2 в интервале верхнеюрских отложений.

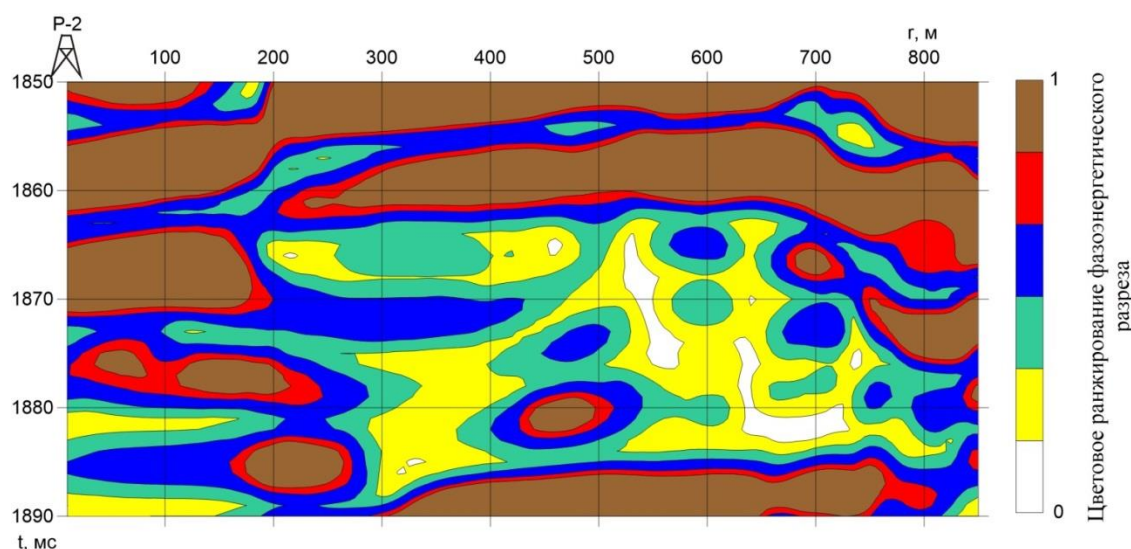


Рис. 4. Фрагмент фазоэнергетического анализа для интервала верхнеюрских отложений

Fig. 4. Fragment of the phase-energy analysis for the Upper Jurassic interval

### Заключение

На базе предложенного ранее метода фазочастотной деконволюции разработан алгоритм фазоэнергетического анализа сейсмических волн. В основу алгоритма положены характерные особенности фазовых спектров сейсмических волн, отраженных от границ продуктивной толщи, содержащей углеводороды. Для оценки эффективности алгоритма путем вычислительного эксперимента проведены исследования на различных моделях геологических сред. При этом каждая модель соответствовала геологическим средам, которые характеризовались своей скоростью, плотностью и параметром поглощения. Численные значения параметров сред задавались исходя из литологического состава среды, степени уплотнения и ряда других факто-

ров и выбирались близкими к параметрам верхнеюрского продуктивного горизонта Томской области. По результатам проведения фазоэнергетического анализа были построены фазоэнергетические разрезы, позволяющие проводить прогноз геологического разреза на предмет наличия углеводородов. Для этих целей предлагается на изображениях фазоэнергетических разрезов выделять зоны с аномально низкими значениями энергии. Приведенный пример построения фазоэнергетического разреза по реальным данным в интервале верхнеюрских отложений подтверждает перспективность применения фазоэнергетического анализа для прогноза геологического разреза.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (№ 23-21-00259).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fuh D., Cohen I., Vassiliou A. A. Three-dimensional sparse seismic deconvolution based on Q attenuation model // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – Anaheim, California, USA: Society of Exploration Geophysicists, 2018. – P. 491–495.
2. Lines L.R., Treitel S. Cascaded deconvolution filters // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – Anaheim, California, USA: Society of Exploration Geophysicists, 2018. – P. 4091–4095.
3. Mohamed Mhmod, Feng Xuan, Xu Cong. Parameters effects on spiking deconvolution of land seismic data // Global Geology. – 2015. – V. 18 (4). – P. 226–231.
4. Оценка автокорреляционных функций данных инженерной сейсморазведки при выполнении деконволюции / В.В. Романов, К.С. Сергеев, М.Д. Кауркин, А.А. Иванов // Геофизика – 2022. – № 1. – С. 77–83.
5. Станкевич Л.С. Обработка сейсмических разрезов методом динамического сжатия // Геофизика, геофизическое приборостроение. – 2015. – № 1 (21). – С. 78–85.
6. Митрофанов Г.М. Гомоморфная фильтрация и слепая деконволюция // Технологии сейсморазведки. – 2015. – № 1. – С. 46–56.
7. Egbai J.C., Atakro E., Aigbogun C.O. Predictive deconvolution in seismic data processing in Atala prospect of rivers State, Nigeria // Advances in Applied Science Research. – 2012. – V. 3 (1). – P. 520–529.
8. Кунченко Д.С., Овчинников К.Р., Фиников Д.Б. О задачах деконволюции сейсмических записей и возможностях контроля искажений формы сигнала // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2022. – № 3. – С. 79–88.
9. Кунченко Д.С., Фиников Д.Б., Шалашников А.В. Влияние фазового спектра сигнала на результаты робастной деконволюции // ГеоЕвразия 2020. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии: Труды III Международной геолого-геофизической конференции и выставки. – Тверь, ООО «Пол-лиПРЕСС», 2020. – Т. III (III). – С. 45–48.
10. Фиников Д.Б. Симметрирующие фильтры // Технологии сейсморазведки. – 2007. – № 1. – С. 26–36.
11. Сильвия М.Т., Робинсон Э.А. Обратная фильтрация геофизических временных рядов при разведке на нефть и газ. – М.: Недра, 1983. – 382 с.
12. Lindberg D.V., More H. Blind categorical deconvolution in two-level hidden Markov models // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2014. – V. 52. – P. 7435–7447.
13. Idan Ram, Israel Cohen. Multichannel deconvolution of seismic signals using statistical MCMC methods // IEEE Transactions on signal processing. – 2010. – V. 58. – № 5. – P. 2757–2770.
14. Deconvolution of seismic signals in time and frequency domain / Kedarnath Senapati, Aurobinda Routray, Santosh Dhubia, William Kumar Mohanty // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. – 2011. – V. 4. – № 1. – P. 29–47.
15. Optimal seismic deconvolution: distributed algorithms / K.N. Plataniotis, S.K. Katsikas, D.G. Lainiotis, A.N. Venetsanopoulos // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1998. – V. 36. – P. 779–792.
16. Veeken P.C.H., Da Silva M. Seismic inversion methods and some of their constraints // First break. – 2004. – V. 22. – P. 47–70.

17. Kazemi N., Bongajum E., Sacchi M. Surface-consistent sparse multichannel blind deconvolution of seismic signals // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2016. – V. 54. – P. 3200–3207.
18. Овчинников К.Р., Рябинский М.А., Фиников Д.Б. Фазовая деконволюция 3D данных сейсморазведки. Технологические и методологические аспекты применения статистического алгоритма коррекции фазового спектра // Геофизика. – 2022. – № 3. – С. 16–22.
19. Informational technologies of processing and interpretation of data for surface and in wells seismic observations for solving of tasks of geological section prognosis / V.P. Ivanchenkov, O.N. Vylegzhanin, O.V. Orlov, A.I. Kochegurov // Proc. 9th Russian–Korean International Symposium on Science and Technology. KORUS–2005. – Novosibirsk, 2005. – V. 1. – P. 159–162.
20. Фазочастотная деконволюция сейсмических волн / А.И. Кочегуров, Е.А. Кочегурова, И.Э. Ильясова, V. Geringer, K. Reif // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 12. – С. 84–93.
21. Иванченков В.П., Кочегуров А.И., Орлов О.В. Применение методов фазочастотного анализа сейсмических волн для изучения околоскважинного пространства // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 10. – С. 58–63.

Поступила: 05.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 20.04.2023 г.

#### Информация об авторах

**Кочегуров А.И.**, кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кочегурова Е.А.**, кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Орлов О.В.**, кандидат технических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.834

## APPLICATION OF PHASE-ENERGY ANALYSIS OF SEISMIC WAVES FOR GEOLOGICAL SECTION PREDICTION

Alexander I. Kochegurov<sup>1</sup>,  
kaicc@tpu.ru

Elena A. Kochegurova<sup>1</sup>,  
kocheg@mail.ru

Oleg V. Orlov<sup>1</sup>,  
orloff234@gmail.ru

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

**Relevance.** One of the main tasks in predicting a geological section is the task of determining the type of the section and mapping types over the area under study, as well as assessing the absorbing and dispersive properties of geological media. To solve these problems, specialized software-algorithmic complexes for processing and interpreting seismic data are currently widely used. In most modern complexes for forecasting a geological section, the information extracted from the kinematic and dynamic characteristics of seismic waves is used. Based on the information received and the data on the geophysical survey of wells, ideas are formed about the material composition of sediments, the presence of productive strata in the study area. This approach made it possible in a number of regions of Russia, including Western Siberia, to obtain interesting and important results related to the discovery of productive sedimentary strata and the assessment of their oil and gas content, which was confirmed by practice. At the same time, the results of practical activities have shown that when conducting studies of many areas, there are areas where the percentage of identifying false anomalies in geological environments and making erroneous decisions in the forecast is still quite large. This is due, among other things, to the fact that in the analysis of the recorded seismic field, for predicting geological section, the energy characteristics of the reflected waves are mainly used, and changes in the phase spectra are practically not taken into account. Thus, the integrated use of the characteristics of reflected seismic waves (amplitude and phase) in the prediction of a geological section is a very urgent task.

**The aim** of the work is to carry out phase-energy analysis for various models of seismic fields based on the method of phase-frequency deconvolution for predicting the geological section.

**Methods:** computational experiment, inverse filtering, discrete Fourier transform.

**Results.** The authors developed the algorithm for phase-energy analysis of seismic waves, which is based on the results of phase-frequency deconvolution. The algorithm was studied on various models of geological environments, and phase-energy sections were constructed, which make it possible to identify zones with anomalously low energy values for subsequent oil and gas potential diagnostics. The paper introduces the example of constructing a phase-energy section based on real data in the interval of Upper Jurassic deposits.

### Key words:

geological section prediction, phase-frequency deconvolution, phase-energy analysis, inverse compression filter, models of geological environments.

The research was supported by the RSF grant (no. 23-21-00259).

### REFERENCES

1. Fuh D., Cohen I., Vassiliou A. A. Three-dimensional sparse seismic deconvolution based on Q attenuation model. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. Anaheim, California, USA, Society of Exploration Geophysicists, 2018. pp. 491–495.
2. Lines L.R., Treitel S. Cascaded deconvolution filters. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. Anaheim, California, USA, Society of Exploration Geophysicists, 2018. pp. 4091–4095.
3. Mohamed Mhmod, Feng Xuan, Xu Cong. Parameters effects on spiking deconvolution of land seismic data. *Global Geology*, 2015, vol. 18 (4), pp. 226–231.
4. Romanov V.V., Sergeev K.S., Kaurkin M.D., Ivanov A.A. Estimate of near-surface seismic data auto-correlation functions in deconvolution process. *Geophysics*, 2022, no.1, pp. 77–83. In Rus.
5. Stankevich L.S. Obrabotka seismicheskikh razrezov metodom dinamicheskogo szhatiya [Processing seismic cuts by the method of dynamic compression]. *Geofizika, geofizicheskoe priborostroenie*, 2015, no. 1 (21), pp. 78–85.
6. Mitrofanov G.M. Homomorphic filtering and deconvolution. *Technologies of seismic exploration*, 2015, no. 1, pp. 46–56. In Rus.
7. Egbai J.C., Atakpo E., Aigbogun C.O. Predictive deconvolution in seismic data processing in Atala prospect of rivers State, Nigeria. *Advances in Applied Science Research*, 2012, vol. 3 (1), pp. 520–529.
8. Kunchenko D.S., Ovchinnikov K.R., Finikov D.B. O zadachakh dekonvolutsii seismichikh zapisey vozmozhnostyakh kontrolya iskazheniy formy signala [On the problems of deconvolution of seismic records and the possibilities of controlling waveform distortions]. *Instruments and systems for exploration geophysics*, 2022, no. 3, pp. 79–88.
9. Kunchenko D.S., Finikov D.B., Shalashnikov A.V. Vliyanie fazovogo spektra signala na rezultaty robustnoy dekonvolutsii [Influence of the phase spectrum of a signal on the results of robust deconvolution]. *Proceedings of the III International Geological and Geophysical Conference and Exhibition. GeoEurasia 2020. Modern technologies for the study and development of the bowels of Eurasia*. Tver, PolyPRESS LLC, 2020. Vol. III (III), pp. 45–48.
10. Finikov D.B. Balancing filters. *Technologies of seismic exploration*, 2007, no. 1, pp. 26–36. In Rus.
11. Silvia M.T., Robinson E.A. Obratnaya filtratsiya geofizicheskikh vremennykh ryadov pri razvedke na nefi i gaz [The return filtration of geophysical temporary ranks at investigation on oil and gas]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 382 p.
12. Lindberg D.V., More H. Blind categorical deconvolution in two-level hidden Markov models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, vol. 52, pp. 7435–7447.

13. Idan Ram, Israel Cohen. Multichannel deconvolution of seismic signals using statistical MCMC methods. *IEEE Transactions on signal processing*, 2010, vol. 58, no. 5, pp. 2757–2770.
14. Kedarnath Senapati, Aurobinda Routray, Santosh Dhubia, William Kumar Mohanty. Deconvolution of seismic signals in time and frequency domain. *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 29–47.
15. Plataniotis K.N., Katsikas S.K., Lainiotis D.G., Venetsanopoulos A.N. Optimal seismic deconvolution: distributed algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, vol. 36, pp. 779–792.
16. Veeken P.C.H., Da Silva M. Seismic inversion methods and some of their constraints. *First break*, 2004, vol. 22, pp. 47–70.
17. Kazemi N., Bongajum E., Sacchi M. Surface-consistent sparse multichannel blind deconvolution of seismic signals. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 2016, vol. 54, pp. 3200–3207.
18. Ovchinnikov K.R., Ryabinskiy M.A., Finikov D.B. Phase deconvolution of 3D seismic data technological and methodological aspects of statistical algorithm for phase spectrum correction. *Geophysics*, 2022, no. 3, pp. 16–22. In Rus.
19. Ivanchenkov V.P., Vylegzhanin O.N., Orlov O.V., Kochegurov A.I. Informational technologies of processing and interpretation of data for surface and in wells seismic observations for solving of tasks of geological section prognosis. *Proc. 9th Russian–Korean International Symposium on Science and Technology. KORUS–2005*. Novosibirsk, 2005. Vol. 1, pp. 159–162.
20. Kochegurov A.I., Kochegurova E.A., Ilyasova I.E., Geringer V., Reif K. Phase-frequency deconvolution of seismic waves. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 12, pp. 84–93. In Rus.
21. Ivanchenkov V.P., Kochegurov A.I., Orlov O.V. Methods of phase-frequency analysis of seismic waves and their application in studying borehole environment. *Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry*, 2015, no. 10, pp. 58–63. In Rus.

Received: 5 April 2023.

Reviewed: 20 April 2023.

#### Information about the authors

**Alexander I. Kochegurov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Elena A. Kochegurova**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Oleg V. Orlov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 553.9

## ПОСТРОЕНИЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗА ЗНАЧЕНИЙ СМАЧИВАЕМОСТИ ПО ВОСТОЧНО-ЛАМБЕЙШОРСКОМУ И ЯРЕЙЮСКОМУ МЕСТОРОЖДЕНИЯМ

Сае́тгараев Альмир Дамирович<sup>1</sup>,  
Almir.Saetgaraev@lukoil.com

Галкин Владислав Игнатьевич<sup>2</sup>,  
vgalkin@pstu.ru

Путилов Иван Сергеевич<sup>2,3</sup>,  
Ivan.Putilov@pnn.lukoil.com

Неволин Антон Игоревич<sup>4</sup>,  
Anton.Nevolin@pnn.lukoil.com

<sup>1</sup> ООО «ЛУКОЙЛ-Коми»,  
Россия, 169710, г. Усинск, ул. Нефтяников, 31.

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

<sup>3</sup> ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть»,  
Россия, 614015, г. Пермь, ул. Пермская, 3 «А»

<sup>4</sup> ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть»,  
Россия, 614066, г. Пермь, ул. Советской Армии, 29.

**Актуальность.** Все отечественные стандарты по проведению лабораторных исследований на образцах керна пород нефтяных и газовых пластов предписывают произвести его очистку от углеводородов с помощью экстракции. Очистка образцов керна входит в обязательный этап подготовки к основным видам лабораторных исследований. Для этого используются специальные экстракционно-дистилляционные аппараты с применением различных органических растворителей. Образцы керна, помещенные в аппараты, в течение длительного времени проходят многократные циклы очистки с высокотемпературным воздействием. Такой подход к подготовке образцов керна является традиционным и применяется как для стандартных, так и для специальных исследований. Однако экстракция приводит к искаженным представлениям о естественной смачиваемости поверхности породы, которая подвергается изменению и, как правило, гидрофилизуется. В связи с этим важно провести оценку смачиваемости породы на различных этапах подготовки образцов керна – до и после процедуры экстракции.

**Цель:** разработка методики прогноза величины смачиваемости образцов керна до экстракции от углеводородов с применением статистических методов исследования.

**Объекты:** образцы керна задонских отложений (D3zd) Восточно-Ламбейшорского месторождения, артинские (P1ar) и асельско-сакмарские (P1a+s) отложения Ярейюского месторождения.

**Методы:** метод Амотта (Амотт–Харви), статистические методы.

**Результаты.** С помощью проведенного комплекса лабораторных исследований с использованием различных статистических методов была разработана методика прогноза значений показателя смачиваемости по нефти до экстракции на основе фильтрационно-емкостных свойств образцов керна.

### Ключевые слова:

смачиваемость, керн, экстракция, петрофизика, статистические методы.

### Введение

Смачиваемость пород-коллекторов месторождений нефти и газа является одной из основных характеристик, влияющих на распределение и фильтрацию пластовых флюидов в пустотном пространстве [1–6]. В связи с этим определение смачиваемости является крайне важной задачей научного сопровождения как при подсчете запасов, так и при разработке нефтегазовых месторождений.

В лабораторной практике применяются различные методы определения смачиваемости: метод краевого угла, метод Амотта (Амотт–Харви) [7, 8], методика Горного бюро (USBM) [9–11], комбинированный ме-

тод Амотта–USBM [12, 13], метод Тульбовича (ОСТ 39-180-85) [14].

В данной работе изучаются результаты определения смачиваемости, полученные по одному из основных методов, который используется в отечественной лабораторной практике – метод Амотта (Амотт–Харви).

Данный метод основан на действиях впитывания и принудительного вытеснения флюидов (нефть, вода) на образцах керна. Считается, что смачивающий флюид впитывается в образец керна самопроизвольно и вытесняет несмачивающий флюид. Различают оригинальный метод Амотта и модифицированный метод Амотта–Харви. Разница методов зависит от началь-

ной стадии подготовки образцов. Оригинальный метод Амотта начинают проводить при остаточной нефтенасыщенности, Амотт–Харви – при начальной нефтенасыщенности и остаточной водонасыщенности.

Показатель смачиваемости Амотта–Харви ( $I$ ) рассчитывается по разнице индексов смачиваемости водой (далее –  $I_w$ ) и смачиваемости нефтью (далее –  $I_o$ ):

$$I = I_w - I_o,$$

$I_w$  представляет собой отношение объема нефти, вытесненного за счет произвольной капиллярной пропитки водой ( $V_{osp}$ ), к суммарному объему нефти, вытесненному за счет впитывания и принудительного вытеснения водой ( $V_{ot}$ ):

$$I_w = V_{osp} / V_{ot},$$

$I_o$  представляет собой отношение объема воды, вытесненного за счет произвольной капиллярной пропитки нефтью ( $V_{wsp}$ ), к суммарному объему воды, вытесненному за счет впитывания и принудительного вытеснения нефтью ( $V_{wt}$ ):

$$I_o = V_{wsp} / V_{wt}.$$

С помощью метода Амотта–Харви определяется средняя смачиваемость породы.

Характеристика поверхности породы в зависимости от значения индекса смачиваемости приведена в табл. 1.

**Таблица 1.** Индекс смачиваемости Амотта–Харви

**Table 1.** Amott–Harvey wetting indices

Индекс Index	Гидрофильная порода Water wet	Нейтральная смачиваемость Neutral wet	Гидрофобная порода Oil wet
$I$	от (from) +0,3 до (to) +1,0	от (from) –0,3 до (to) +0,3	от (from) –0,3 до (to) –1,0

Как правило, исследования по определению смачиваемости проводятся на образцах керна, предварительно очищенных от углеводородов, с использованием различных растворителей, таких как хлороформ, спиртобензольная смесь, толуол и др. Поверхность очищенных таким образом образцов приводит к изменению смачиваемости керна [15–17]. В результате этого полученные данные о характеристике смачиваемости породы являются ошибочными. Для проверки изменения смачиваемости в процессе подготовки образцов керна к исследованиям проводят замеры данного параметра до и после процедуры экстракции [18–20].

В связи с этим актуальным становится вопрос о прогнозе показателя смачиваемости без проведения дополнительных исследований, что позволит значительно сократить трудозатраты на проведение экспериментов. Для этой цели была разработана методика прогноза показателя смачиваемости  $I_o$  до экстракции путем детального статистического анализа.

#### Характеристика объектов исследования

В качестве объектов исследования были выбраны образцы керна Восточно-Ламбейшорского ( $D_{3zd}$ ) и Ярейского месторождений ( $P_{la+s}$ ,  $P_{lar}$ ) Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Все отложения представлены карбонатными породами, в основном известняками. Наибольшее распространение из вторичных изменений пород имеет кальцитизация и доломитизация. По классификации К.И. Багринцевой

[21] все породы можно отнести к группе С (класс VI–VII) с низкой полезной емкостью и низкими фильтрационно-емкостными свойствами.

#### Методика проведения исследования

Для проведения статистического анализа из колонки керна продуктивных отложений выбуривались стандартные образцы диаметром и длиной 30 мм. Определение характеристики смачиваемости объектов исследований осуществлялось на основании расчета индекса смачиваемости  $I_o$  на образцах керна до экстракции. Гидрофобность породы при расчете индекса смачиваемости  $I_o$  увеличивается от 0 (более гидрофильная порода) к 1.

После определения смачиваемости образцы экстрагировались в спирто-бензольной смеси с использованием аппаратов Сокслета. Далее определялись пористость  $K_p$  и проницаемость по газу  $K_{прг}$ . Значения  $K_p$  образцов определялись методом жидкостенасыщения (Преображенского) и гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 26450.1-85.  $K_{прг}$  определялся методом стационарной фильтрации газа через образец горной породы в линейном направлении под действием разности давлений согласно ГОСТ 26450.2-85.

Таким образом были получены исходные данные для проведения статистического анализа. На первом этапе статистического анализа выполнялось сравнение средних значений  $I_o$ ,  $K_p$ ,  $K_{прг}$  по  $t$ -критерию Стьюдента (табл. 2).

**Таблица 2.** Сравнение средних значений по  $t$ -критерию Стьюдента

**Table 2.** Comparisons of mean values by Student  $t$ -test

Показатели Indicators	Ярейское, $P_{lar}$ (10 образцов) Yareyu, $P_{lar}$ (10 samples)	Ярейское, $P_{la+s}$ (37 образцов) Yareyu, $P_{la+s}$ (37 samples)	Восточно-Ламбейшорское, $D_{3zd}$ (71 образец) Eastern Lambeishor, $D_{3zd}$ (71 samples)	Значение $t$ – верхняя строка, значение критерия $p$ – нижняя строка Value of $t$ – top line, value of $p$ criterion – bottom line
$K_p$ , %	12,8±3,8*	11,8±4,7	–	0,700218 0,487318
	12,8±3,8	–	7,1±3,9	4,260005 0,000055
	–	11,8±4,7	7,1±3,9	5,403738 0,000000
$K_{прг}$ , мД (mD)	2,17±3,44	24,25±40,34	–	–1,71287 0,105647
	2,17±3,44	–	36,39±105,33	–1,02089 0,310871
	–	24,25±40,34	36,39±105,33	–0,680429 0,497854
$I_o$	0,39±0,18	0,32±0,16	–	1,058907 0,295171
	0,39±0,18	–	0,39±0,20	–0,113702 0,909759
	–	0,32±0,16	0,39±0,20	–1,85253 0,066680

\*среднеарифметическое значение±среднеквадратичное отклонение.

\*arithmetic mean ± standard deviation.



Из табл. 2 видно, что статистические различия в средних значениях наблюдаются только по  $K_n$ .

Для оценки комплексных различий указанных в табл. 2 показателей в зависимости от изучаемых пластов были построены линейные дискриминантные функции (далее – ЛДФ) методом пошагового анализа. Здесь в качестве классификатора использованы изучаемые пласты. Построенные ЛДФ имеют следующие виды:

$$Z_1 = 0,25354K_n - 0,00777K_{\text{прг}} - 1,09712I_o - 1,76337, \\ \text{при } R = 0,563, \chi^2 = 42,267, p < 10^{-5};$$

$$Z_2 = -0,03047K_n + 0,00778K_{\text{прг}} - 4,94369I_o - 4,92369, \\ \text{при } R = 0,141, \chi^2 = 2,119, p = 0,346545.$$

Анализ ЛДФ показывает, что более сильной является функция  $Z_1$ . Однозначно разделить образцы по данным  $K_n$ ,  $K_{\text{прг}}$  и  $I_o$  в зависимости от группы «месторождение/пласт» по имеющимся данным не представляется возможным, о чем свидетельствует процент верного распознавания, который равен 66,97 %.

Все это указывает на то, что данные показатели нужно исследовать, с одной стороны, как общую совокупность, с другой стороны, необходимо учитывать дифференцированно и особенности влияния значений  $K_n$  и  $K_{\text{прг}}$  на величину  $I_o$  по пластам. Поэтому изучение влияния значений  $K_n$  и  $K_{\text{прг}}$  на величину  $I_o$  выполнено путем построения многоуровневых многомерных моделей.

На первом уровне статистического моделирования исследуется влияние значений  $K_n$  и  $K_{\text{прг}}$  на  $I_o$  по данным всех трех пластов.

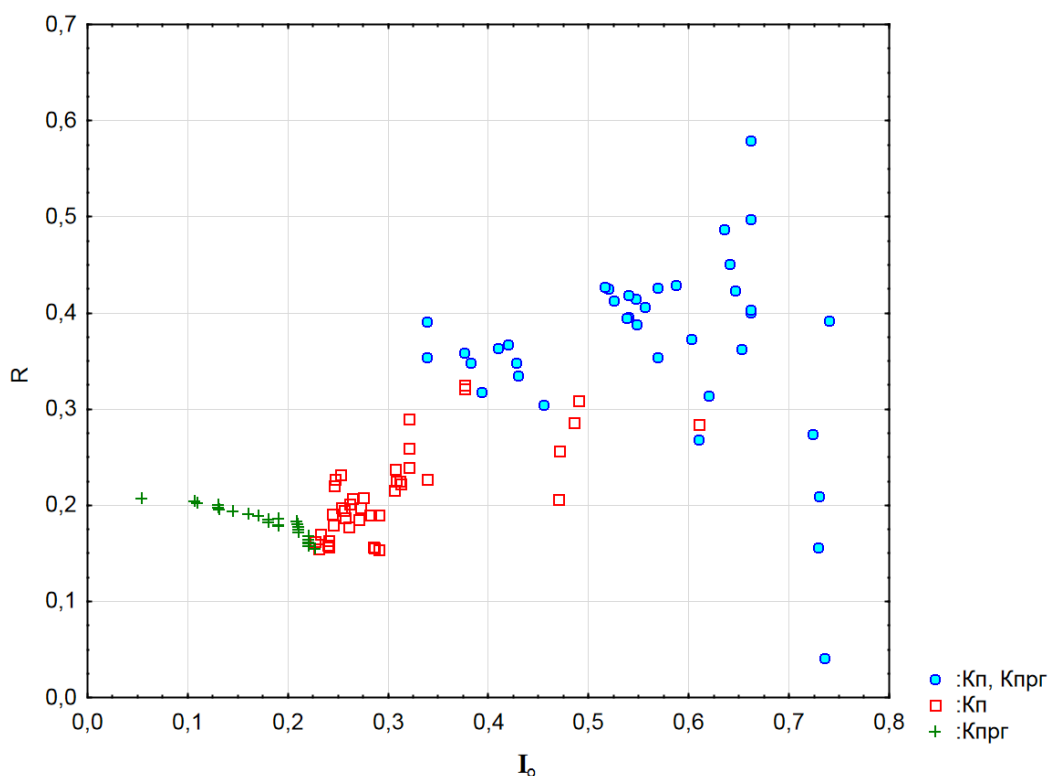
Модель первого уровня имеет следующий вид:  $I_o^{M-1} = 0,363 + 0,000476K_{\text{прг}}$ , при  $R = 0,207$ ,  $p = 0,030$ . Данное уравнение регрессии может быть использовано при  $K_{\text{прг}}$  в интервале 0,001–582,2 мД.

Анализ данной модели показывает, что соотношение  $I_o$  и  $I_o^{M-1}$  характеризуется очень сложным видом. Для оценки влияния значений  $K_n$  и  $K_{\text{прг}}$  на разных диапазонах на величину  $I_o$  она была отранжирована от максимального ( $I_o = 0,815$ ) до минимального ( $I_o = 0,036$ ). Процесс формирования значений  $I_o$  в зависимости от показателей  $K_n$  и  $K_{\text{прг}}$  выполнен по следующей схеме: первое уравнение регрессии строится по 4 максимальным значениям  $I_o$  ( $n = 4$ ), следующая модель при  $n = 5$  и так далее до  $n = 109$ . Таким образом было построено 106 многомерных моделей.

Анализ моделей показывает, что  $K_n$  принимал участие в построении 80 моделей. Отметим, что при  $I_o > 0,339$  данный показатель участвовал в формировании моделей в основном совместно с  $K_{\text{прг}}$ .

Далее в диапазоне значений от 0,339 до 0,227 модели формировались только с участием  $K_n$  при значениях  $I_o$  от 0,227 до 0,054, показатель  $K_n$  в построении моделей не участвовал. Показатель  $K_{\text{прг}}$  участвовал в построении 64 моделей. При  $I_o$  от 0,227 до 0,054 показатель  $K_{\text{прг}}$  принимал участие в построении всех моделей индивидуально.

Таким образом, анализ 106 моделей показал, что показатели  $K_n$  и  $K_{\text{прг}}$  избирательно принимают участие в формировании значений прогнозной модели смачиваемости (далее –  $I_o^M$ ). Приведем график изменения значений множественного коэффициента корреляции  $R$  в зависимости от величин  $I_o$  (рисунок).



**Рисунок.** Изменения значений коэффициентов множественной корреляции  $R$  в зависимости от  $I_o$

**Figure.** Changes in the values of the coefficients of multiple correlation  $R$  depending on  $I_o$

Отсюда видно, что по значению  $R$  и использован-  
ным в уравнениях регрессии показателям можно выде-  
лить три участка. Первый при  $I_o > 0,35$ , второй  
 $0,230 < I_o < 0,35$  и третий при  $I_o < 0,230$ . По этим участкам  
соотношения между  $K_{\text{п}}$  и  $K_{\text{прг}}$  в зависимости от значе-  
ний  $I_o$  значительно различаются, о чем свидетельству-  
ют уравнения регрессии, приведенные в табл. 3.

**Таблица 3.** Уравнения регрессии

**Table 3.** Regression equations

Классы смачиваемости Wettability classes	Уравнение регрессии Regression equation	$r$	$p$
$I_o > 0,350$	$K_{\text{прг}} = -52,515 + 11,333K_{\text{п}}$	0,507	0,0003
$0,230 < I_o < 0,350$	$K_{\text{прг}} = -9,068 + 2,857K_{\text{п}}$	0,309	0,0667
$I_o < 0,230$	$K_{\text{прг}} = -0,533 + 0,751K_{\text{п}}$	0,226	0,266

Анализ уравнений регрессии показывает, что ста-  
тистически значимая корреляционная связь между  $K_{\text{п}}$   
и  $K_{\text{прг}}$  наблюдается при величине смачиваемости  
 $I_o > 0,350$ . Отметим, что при снижении значений  $I_o$  в  
выделенных классах значения коэффициентов  $r$   
уменьшаются. По классам смачиваемости были по-  
строены модели второго статистического уровня, ко-  
торые приведены в табл. 4.

**Таблица 4.** Модели второго статистического уровня

**Table 4.** Models of the second statistical level

Классы смачиваемости Wettability classes	Уравнение регрессии Regression equation	$R(r)$	$p$
$I_o > 0,350$	$I_o^{M-2} = 0,492 + 0,009372K_{\text{п}} - 0,000158K_{\text{прг}}$	0,348	<0,062
$0,230 < I_o < 0,350$	$I_o^{M-3} = 0,269 + 0,000477K_{\text{п}} + 0,000225K_{\text{прг}}$	0,151	<0,682
$I_o < 0,230$	$I_o^{M-4} = 0,170 + 0,000505K_{\text{п}} + 0,000092K_{\text{прг}}$	0,170	<0,887

Модели второго уровня в зависимости от значений  
 $I_o$  характеризуются разными знаками при показателях  
 $K_{\text{п}}$  и  $K_{\text{прг}}$ . Модель, построенная при  $I_o > 0,350$ , имеет  
положительный знак при  $K_{\text{п}}$  и отрицательный при  
 $K_{\text{прг}}$ . Данная модель является статистически более  
сильной, по сравнению с моделями при  $I_o < 0,350$ .

Модели второго уровня можно использовать: при  
 $I_o > 0,350$  в диапазонах по  $K_{\text{п}}$  1,38–25,7%, по  $K_{\text{прг}}$   
0,001–582,2 мД; при  $0,230 < I_o < 0,350$  в диапазонах по  
 $K_{\text{п}}$  0,68–18,8 %, по  $K_{\text{прг}}$  0,038–275,6 мД; при  $I_o < 0,230$  в  
диапазонах по  $K_{\text{п}}$  2,73–19,53 %, по  $K_{\text{прг}}$  0,064–75,18 мД.

Данные значения  $I_o^M$ , вычисленные по моделям пер-  
вого и второго статистических уровней, были использо-  
ваны при построении моделей третьего статистического  
уровня. Модели, которые приведены в табл. 5, построе-  
ны раздельно по Восточно-Ламбейшорскому (пласт  $D_{3\text{зд}}$ )  
и Ярейюскому (пласты  $P_{1\text{ар}}$ ,  $P_{1\text{а+с}}$ ) месторождениям.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Добрынин В.М., Вендельштейн Б.Ю., Кожевников Д.А. «Петрофизика (Физика горных пород)» – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. – 368 с.
- Кобранова В.Н. Петрофизика. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра, 1986. – 392 с.
- Амикс Дж., Басс Д., Уайтинг Р. Физика нефтяного пласта. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 568 с.

**Таблица 5.** Модели третьего статистического уровня

**Table 5.** Models of the third statistical level

Месторождения Fields	Уравнение регрессии Regression equation	$R(r)$	$p$
Восточно-Ламбейшорское, ( $D_{3\text{зд}}$ ) Eastern Lambeishor, $D_{3\text{зд}}$	$I_o^{MM} = 0,988 - 5,8932I_o^{M-1} + 2,5433I_o^{M-2+3+4} + 8,8513(I_o^{M-1})^2 - 4,723(I_o^{M-1})(I_o^{M-2+3+4}) + 0,392(I_o^{M-2+3+4})^2$	0,906	<10 <sup>-5</sup>
Ярейюское, ( $P_{1\text{ар}}$ ) Yareyu, $P_{1\text{ар}}$	$I_o^{MM} = -92,4424 + 550,8041I_o^{M-1} - 37,475I_o^{M-2+3+4} - 815,6975(I_o^{M-1})^2 + 107,225(I_o^{M-1})(I_o^{M-2+3+4}) - 1,079(I_o^{M-2+3+4})^2$	0,905	<10 <sup>-5</sup>
Ярейюское, ( $P_{1\text{а+с}}$ ) Yareyu, $P_{1\text{а+с}}$	$I_o^{MM} = -10,585 + 57,4265I_o^{M-1} - 2,181I_o^{M-2+3+4} - 77,5502(I_o^{M-1})^2 + 8,1299(I_o^{M-1})(I_o^{M-2+3+4}) + 0,0379(I_o^{M-2+3+4})^2$	0,946	<10 <sup>-5</sup>

Отсюда видно, что модели, построенные на треть-  
ем уровне статистического моделирования, обладают  
очень сильными статистическими характеристиками,  
что свидетельствует о том, что разработанная после-  
довательная методика прогноза значений  $I_o^M$  позволя-  
ет достаточно точно определять значения  $I_o^{MM}$  по ве-  
личинам  $K_{\text{п}}$  и  $K_{\text{прг}}$ . Поэтому представляется возмож-  
ным по данным  $K_{\text{п}}$  и  $K_{\text{прг}}$  по изучаемым пластам  
определять значения  $I_o^{MM}$ . Данная методика может  
быть реализована для  $D_{3\text{зд}}$  отложений Восточно-  
Ламбейшорского месторождения при  $K_{\text{п}}$  в диапазоне  
0,68–25,73 %, при  $K_{\text{прг}}$  в интервале 0,38–582,2 мД. Для  
отложений  $P_{1\text{ар}}$  Ярейюского месторождения методику  
можно реализовать при  $K_{\text{п}}$  в диапазоне 1,38–19,53 %, при  
 $K_{\text{прг}}$  в интервале 0,01–43,5 мД. Для  $P_{1\text{а+с}}$  отложе-  
ний Ярейюского месторождения значения  $I_o^{MM}$  можно  
вычислять при  $K_{\text{п}}$  в диапазоне 4,73–25,76 %, при  $K_{\text{прг}}$   
в интервале 0,06–172,8 мД.

## Выводы

Таким образом, выполненное многоуровневое  
многомерное статистическое моделирование позво-  
лило разработать методику прогноза значений  $I_o^{MM}$  по  
величинам  $K_{\text{п}}$  и  $K_{\text{прг}}$  для Восточно-Ламбейшорского  
и Ярейюского месторождений. Построенные много-  
мерные модели являются статистически значимыми.

Детальный анализ разработанных моделей пока-  
зал, что при высоких значениях  $I_o$  данная величина в  
основном определяется величинами  $K_{\text{п}}$  и  $K_{\text{прг}}$ , при  
низких значениях  $I_o$  зависит от  $K_{\text{прг}}$ . Это показывает,  
что с увеличением гидрофобности породы растет  
совместное влияние  $K_{\text{п}}$  и  $K_{\text{прг}}$ , с увеличением гидро-  
фильности основной вклад вносит параметр  $K_{\text{п}}$ .

Используя известные значения  $K_{\text{п}}$  и  $K_{\text{прг}}$ , в сква-  
жинах возможно построение схем изменения значе-  
ний  $I_o$  по всему разрезу.

- Гудок Н.С., Богданович Н.Н., Мартынов В.Г. Определение физических свойств нефтеводосодержащих пород. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 592 с.
- Wettability determination of core samples through visual rock and fluid imaging during fluid injection / M. Shneider, F. Osselin, B. Andrews, F. Rezgui, P. Tabeling // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2011. – V. 78. – P. 476–485.

6. The Dynamics of nanoparticle-enhanced fluid displacement in porous media – a pore-scale study / T. Pak, N.L. Archilha, L.F. Montovani, A.C. Moreira, I.B. Butler // Scientific reports. – 2018. – V. 8. – № 11148. – P. 1–10.
7. Михайлов Н.Н., Ермилов М.О., Сечина Л.С. Экспериментальной исследование смачиваемости и анализ ее влияния на фильтрационно-емкостные свойства продуктивных коллекторов Некомской залежи Ново-Уренгойского и Ямбургского месторождений. – Новосибирск, СО РАН, 2012. – 58 с.
8. Amott E. Observations relating to the wettability of porous rocks // Trans AJME. – 1959. – V. 216. – P. 156–162.
9. McPhee C., Reed J., Zubizarreta Iz. Core analysis: a best practice guide. – Amsterdam, Netherlands: Elsevier Publ., 2015. – 829 p.
10. Tiab D., Donaldson C.E. Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties. 2nd ed. – Burlington, USA: Elsevier Publ., 2004. – 881 p.
11. Effect of low salinity water injection on capillary pressure and wettability in carbonates // F. Vajithi, P. Diaz, H. Zabihi, A. Farhadi, S. Dherhani // SCA 2017-051, International Symposium of the Society of Core Analysts. – Vienna, Austria, 2017. – 9 p.
12. Carbonate NMR measurements in a combined Amott–USBM wettability method // E.H. Rios, V.F. Machado, B.C. Santos, W.A. Trevisan, A.L. Compan, D.A. Cruz, R. Skinner, F.M. Eler // SCA 2015-033, International Symposium of the Society of Core Analysts. – St. John's Newfoundland and Labrador, Canada, 2015. – 7 p.
13. Fundamentals of wettability / W. Abdallah, J.S. Buckley, A. Carnegie, J. Edwards, B. Herold, E. Fordham, A. Graue, T. Habashy, N. Seleznev, C. Signer, H. Hussain, B. Montarion, M. Ziauddin // Oilfield Review. – 2007. – V. 19. – № 2 (summer). – P. 44–61.
14. ОСТ 39-180-85. Нефть. Метод определения смачиваемости углеводородосодержащих пород. – М.: ВНИИОЭНГ, 1985. – 13 с.
15. Идентификация гидрофобности пород в различных геологических условиях по комплексу керн и ГИС / Т.Ф. Дьяконова, И.П. Гурбатова, Л.К. Бата, Ю.С. Осипова // Тюмень 2019. – Тюмень: EAGE, 2019. – С. 1–5.
16. Особенности проведения лабораторных исследований негидрофильных пород-коллекторов // И.С. Путилов, Д.Б. Чижов, И.П. Гурбатова, А.И. Неволин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 70–79.
17. Gant P.L., Anderson W.G. Core cleaning for restoration of native wettability // SPE 14875. – 1988. – V. 8. – № 1. – P. 131–138.
18. Неволин А.И., Чижов Д.Б. Оценка остаточной водонасыщенности в системах «вода–газ» и «нефть–вода» для сложнопостроенных карбонатных пород-коллекторов // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых: материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2021. – С. 41–45.
19. Неволин А.И., Чижов Д.Б., Путилов И.С. Комплексный подход к определению остаточной водонасыщенности в лабораторных условиях на керне негидрофильных коллекторов месторождений нефти // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2022. – № 5 (365). – С. 43–49.
20. Временные методические рекомендации по определению коэффициента нефтенасыщенности негидрофильных коллекторов при подсчете запасов нефти и газа месторождений ПАО «ЛУКОЙЛ» в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции / Т.Ф. Дьяконова, В.Ю. Терентьев, А.Д. Саетгараев, И.П. Гурбатова, Е.Е. Кристя, Л.К. Бата, С.В. Мелехин, Д.Б. Чижов, Е.В. Погоничева // Геология и недропользование. – 2021. – Т. 2 (2). – С. 60–74.
21. Багринцева К.И. Условия формирования и свойства карбонатных коллекторов нефти и газа. – М.: РИТУ, 1990. – 285 с.

Поступила 24.11.2022 г.

Прошла рецензирование 21.12.2022 г.

#### Информация об авторах

**Саетгараев А.Д.**, заместитель генерального директора по геологии и разработке месторождений – главный геолог ООО «ЛУКОЙЛ-Коми».

**Галкин В.И.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Путилов И.С.**, доктор технических наук, заместитель директора филиала по научной работе в области геологии филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть»; профессор базовой кафедры нефтегазового инжиниринга Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Неволин А.И.**, начальник отдела физико-гидродинамических исследований филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть».

UDC 553.9

## CONSTRUCTION OF MULTILEVEL STATISTICAL MODELS FOR PREDICTING WETTABILITY INDICATORS OF EASTERN LAMBEISHOR AND YAREYU FIELDS

**Almir D. Saetgaraev<sup>1</sup>,**  
Almir.Saetgaraev@lukoil.com

**Vladislav I. Galkin<sup>2</sup>,**  
vgalkin@pstu.ru

**Ivan S. Putilov<sup>2,3</sup>,**  
Ivan.Putilov@pnn.lukoil.com

**Anton I. Nevolin<sup>4</sup>,**  
Anton.Nevolin@pnn.lukoil.com

<sup>1</sup> LUKOIL-Komi,  
31, Neftyanikov street, Usinsk, 169710, Russia.

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolsky avenue, Perm, 614990, Russia.

<sup>3</sup> PermNIPIneft branch of LUKOIL-Engineering,  
3 A, Permskaya street, Perm, 614015, Russia.

<sup>4</sup> PermNIPIneft branch of LUKOIL-Engineering,  
29, Sovetskoy Armii street, Perm, 614066, Russia.

**The relevance.** All domestic standards for laboratory studies of core oil and gas reservoirs prescribe to clean it from hydrocarbons by extraction. Cleaning of core samples is included in the stage of preparation for the main types of research. For this, a wide range of different solvents and special extraction and distillation apparatuses are used. Core samples placed in the apparatus undergo multiple cleaning cycles for a long time with high-temperature exposure. This approach to the preparation of core samples is traditional and is used for both standard and special studies. However, extraction leads to a distorted understanding of the natural wettability of the rock surface, which is subject to change and, as a rule, hydrophilizes. In this regard, it is of scientific and practical interest to assess rock wettability at various stages of sample preparation – before and after the extraction.

**The main aim:** development of a methodology for predicting the wettability of core samples before extraction from hydrocarbons using statistical research methods.

**Objects:** core samples of the Zadonskaya deposit (D3zd) of the Eastern Lambeishor field, Artinskaya (P1ar) and Assel-Sakmarskaya (P1a+s) deposits of the Yareyu field.

**Methods:** Amott (Amott–Harvey) method, statistical methods.

**Results.** With the help of a set of laboratory studies using various statistical methods, a methodology was developed for predicting the values of the wettability index for oil before extraction based on the porosity and permeability properties of core samples.

### Key words:

wettability, core, extraction, petrophysics, statistical methods.

### REFERENCES

1. Dobrynin V.M., Vendelstein B.Yu., Kozhevnikov D.A. *Petrofizika (Fizika gornykh porod)* [Petrophysics (physics of rocks)]. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas Publ., 2004. 368 p.
2. Kobranova V.N. *Petrofizika* [Petrophysics]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Nedra Publ., 1986. 392 p.
3. Amiks Dzh., Bass D., Uayting R. *Fizika nefryanogo plasta* [Petroleum reservoir engineering]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1962. 568 p.
4. Gudok N.S., Bogdanovich N.N., Martynov V.G. *Opreделение fizicheskikh svoystv neftevododerzhashchikh porod* [Determination of the physical properties of oil-bearing rocks]. Moscow, Nedra-Businesscenter LLC Publ., 2007. 592 p.
5. Shneider M., Osselin F., Andrews B., Rezgui F., Tabeling P. Wettability determination of core samples through visual rock and fluid imaging during fluid injection. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, vol. 78, pp. 476–485.
6. Pak T., Archilha N.L., Montovani L.F., Moreira A.C., Butler I.B. The dynamics of nanoparticle-enhanced fluid displacement in porous media – a pore-scale study. *Scientific reports*, 2018, vol. 8, no. 11148, pp. 1–10.
7. Mikhailov N.N., Ermilov M.O., Sechina L.S. *Eksperimentalnoe issledovanie smachivaemosti i analiz ee vliyaniya na filtratsionno-emkostnye svoystva produktivnykh kollektorov Neokomskoy zalezhi Novo-Urengoyetskogo i Yamburgskogo mestorozhdeniy* [Experimental investigation of wettability and analysis of its effect on filtration-capacity properties of productive reservoirs of the Neocomian bed of the Urengoy and Yamburg deposits]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2012. 58 p.
8. Amott E. Observations relating to the wettability of porous rocks. *Trans AJME*, 1959, vol. 216, pp. 156–162.
9. McPhee C., Reed J., Zubizarreta Iz. *Core analysis: a best practice guide*. Amsterdam, Netherlands, Elsevier Publ., 2015. 829 p.
10. Tiab D., Donaldson C.E. *Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties*. 2<sup>nd</sup> ed. Burlington, USA, Elsevier Publ., 2004. 881 p.
11. Vajihi F., Diaz P., Zabihi H., Farhadi A., Dherhani S. Effect of low salinity water injection on capillary pressure and wettability in carbonates. *SCA 2017-51, International Symposium of the Society of Core Analysts*. Vienna, Austria, 2017. 9 p.
12. Rios E.H., Machado V.F., Santos B.C., Trevisan W.A., Compan A.L., Cruz D.A., Skinner R., Eler F.M. Carbonate NMR measurements in a combined Amott–USBM wettability method. *SCA 2015-33*,

- International Symposium of the Society of Core Analysts*. St. John's Newfoundland and Labrador, Canada, 2015. 7 p.
13. Abdallah W., Buckley J.S., Carnegie A., Edwards J., Herold B., Fordham E., Graue A., Habashy T., Seleznev N., Signer C., Hussain H., Montarion B., Ziauddin M. Fundamentals of Wettability. *Oilfield Review*, 2007, vol. 19, no. 2 (summer), pp. 44–61.
  14. OST 39-180-85. *Neft. Metod opredeleniya smachivaemosti uglevodorodsoderzhashchikh porod* [Method for determining the wettability of hydrocarbon-bearing rocks]. Moscow, VNIIOENG Publ., 1985. 13 p.
  15. Dyakonova T.F., Gurbatova I.P., Bata L.K., Osipova Yu.S. Identifikatsiya gidrofobnosti porod v razlichnykh geologicheskikh usloviyakh po kompleksu kerna i GIS [Identification of hydrophobic rocks in different geological conditions by core and log]. *Tyumen 2019* [Tyumen 2019]. Tyumen, EAGE Publ., 2012. pp. 1–5.
  16. A.I. Specific features of laboratory studies of non-hydrophilic rocks-reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 70–79. In Rus.
  17. Gant P.L., Anderson W.G. Core cleaning for restoration of native wettability. *SPE 14875*, 1988, vol. 3, no. 1, pp. 131–138.
  18. Nevolin A.I., Chizhov D.B. Otsenka ostatnochnoy vodonasyschennosti v istochnikakh «voda–gaz» i «neft–voda» dlya slozhnopostroennykh karbonatnykh porod-kollektorov [Estimation of residual water saturation in «water–gas» and «oil–water» systems for complex carbonate reservoir rocks]. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodov i rudnykh poleznykh iskopayemykh. Materialy XIV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Problems of development of deposits of hydrocarbons and ore minerals. Materials of the XIV All-Russian scientific and technical conference]. Perm, Perm National Research Polytechnic University Publ., 2021. pp. 41–45.
  19. Nevolin A.I., Chizhov D.B., Putilov I.S. Integrated approach to determination of residual water saturation on the core of non-hydrophilic reservoirs of oil fields in laboratory conditions. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*, 2022, no. 5 (365), pp. 43–49. In Rus.
  20. Dyakonova T.F., Terentiev V.Yu., Saetgaraev A.D., Gurbatova I.P., Christia E.E., Bata L.K., Melekhin S.V., Chizhov D.B., Pogonishcheva E.V. Temporary guidelines for determining the oil saturation coefficient of non-hydrophilic reservoirs when calculating the oil and gas reserves of the fields of PJSC LUKOIL in the Timano-Pechora oil and gas province. *Geology and subsoil use*, 2021, no. 2, pp. 60–74. In Rus.
  21. Bagrintseva K.I. *Usloviya formirovaniya i svoystva karbonatnykh kollektorov nefii i gaza* [Formation conditions and properties of oil and gas carbonate reservoirs]. Moscow, RGGU Publ., 1990. 285 p.

Received: 24 November 2022.

Reviewed: 21 December 2022.

#### Information about the authors

**Almir D. Saetgaraev**, deputy general director for geology and field development – chief geologist, LUKOIL-Komi.

**Vladislav I. Galkin**, Dr. Sc., professor, head of the Department of Geology of Oil and Gas, Perm National Research Polytechnic University.

**Ivan S. Putilov**, Dr. Sc., professor, Perm National Research Polytechnic University; deputy director of the branch for scientific work in the field of geology, PermNIPIneft branch of LUKOIL-Engineering.

**Anton I. Nevolin**, head of the Department of Physical and Hydrodynamic Research, PermNIPIneft branch of LUKOIL-Engineering.

УДК 553.6, 553.21/24

## ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИЙ ТРЕПЕЛ ХОТЫНЕЦКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ОРЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ): МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ, СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА, УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ

Белоусов Петр Евгеньевич<sup>1</sup>,  
belousov.peter@list.ru

Карелина Надежда Дмитриевна<sup>1</sup>,  
karelina-98@list.ru

Морозов Иван Аркадьевич<sup>1</sup>,  
ivan.morozov@yandex.ru

Рудмин Максим Андреевич<sup>2</sup>,  
rudminma@tpu.ru

Милютин Виталий Витальевич<sup>3</sup>,  
vmilyutin@mail.ru

Некрасова Наталья Анатольевна<sup>3</sup>,  
nnekrassova@gmail.com

Румянцева Анастасия Олеговна<sup>1</sup>,  
rumyantseva.anastasia2017@yandex.ru

Закусина Ольга Владимировна<sup>1</sup>,  
o.zakusina@yandex.ru

Крупская Виктория Валерьевна<sup>1</sup>,  
krupskaya@ruclay.com

<sup>1</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Россия, 119017, г. Москва, Старомонетный пер., 35.

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

<sup>3</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Россия, 119071, г. Москва, Ленинский пр., 31, корп. 4.

**Актуальность** работы обусловлена необходимостью развития минерально-сырьевой базы месторождений высококачественного сорбционного сырья России, а также изучения свойств природных сорбентов с целью их дальнейшего применения на практике.

**Целью** работы является изучение особенностей геологического строения, условий образования, минерального состава и сорбционных свойств цеолитсодержащего трепела Хотынецкого месторождения.

**Объектом** исследования является Хотынецкое месторождение цеолитсодержащего трепела, изученное полевым отрядом Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН в 2019–2020 гг.

**Методы:** рентгенофазовый и рентгенофлуоресцентный анализ, ИК-спектроскопия, оптическая и сканирующая электронная микроскопия, определение удельной поверхности и распределения пор по размерам, емкость катионного обмена, эксперименты по сорбции цезия, стронция и меди. Также была проведена палеотектоническая реконструкция.

**Результаты.** Продуктивная толща Хотынецкого месторождения состоит из трех пачек, основными полезными компонентами которых являются минералы группы цеолита, опал-кристобалита и смектита. Их содержание достигает 80 %. Образование месторождения происходило в три этапа и связано с первичным накоплением кремнезема в прибрежных морских водах, сносом терригенного глинистого материала с близлежащей суши, дальнейшим уплотнением и переработкой накопленного материала на стадии диагенеза. Образование клиноптилолита связано с повышением pH и растворением опал-кристобалитового и глинистого материала в результате вторичного воздействия низкотемпературных глубинных растворов. Проведенные эксперименты показали, что данное сырье обладает высокими сорбционными характеристиками по отношению к цезию и меди и может применяться в качестве компонента сорбционных смесей и барьеров для очистки загрязненных вод.

### Ключевые слова:

трепел, цеолит, глинистые минералы, сорбция, генезис, Хотынецкое месторождение, мел, Воронежская антеклиз, Орловская область.

### Введение

Природные цеолиты и трепел являются ценным индустриальным сырьем, которое применяют во многих отраслях промышленности, таких как сельское хозяйство и животноводство, нефтехимия и очистка загрязненных вод. За счет высокой способности к водопоглощению данные породы применяют в качестве конденсаторов почв в засушливых регионах, а также в качестве осушающих и гигиенических подстилок для скота и домашних животных. Наличие пористости в трепеле и цеолите способствует поглощению

воды и растворенных в ней питательных веществ, полезных микроэлементов и медленному их высвобождению в засушливые периоды. Кроме того, трепел, как продукт первично биогенных кремнистых отложений, сохраняет высокое содержание фосфора в легко растворимой форме. В нефтехимии их используют в качестве молекулярных сит, катализаторов и эффективных сорбентов при разливе нефтепродуктов. Одним из наиболее развивающихся и перспективных направлений является применение различных силицитов и цеолитов в качестве эффективных сорбентов



при очистке промышленных и природных вод от радионуклидов, тяжелых металлов и органических загрязнителей. Применяются как природные, так и модифицированные разности. Многочисленные экспериментальные и прикладные работы [1–4] показывают, что кремнистые породы и цеолиты являются перспективным и надежным материалом для борьбы с загрязнением окружающей среды.

Однако в России данные породы и минералы имеют весьма ограниченное использование в связи с недостаточной степенью развития минерально-сырьевой базы месторождений высококачественного сырья, что обуславливает актуальность исследований в данном направлении. Несмотря на значительные запасы месторождений цеолитов и цеолитсодержащего сырья, на данный момент разрабатываются только три месторождения, расположенные в Орловской области, Якутии и Забайкальском крае [5].

Другим вопросом, имеющим больше научное, чем прикладное значение, является отсутствие однозначного представления о происхождении подобного типа месторождений. Связано это с тем, что кремнистые био-хемогенные минералы и цеолиты имеют различную геологическую природу, хотя и встречаются вместе, как в случае рассматриваемого месторождения.

Данная работа написана по результатам геологических работ, проведенных полевым отрядом ИГЕМ РАН в 2019 и 2020 гг. на Хотынецком месторождении.

#### **Геологическое строение района исследования и месторождения**

Хотынецкое месторождение цеолитсодержащего трепела расположено в одноименном районе Орловской области и состоит из трех участков: Ворытнецовского и Богородицкого, а также Образцовского, который на данный момент разрабатывается. Основным направлением использования данных пород является сельское хозяйство и производство наполнителей для кошачьих туалетов.

В структурном плане изучаемая территория расположена в центральной части Русской платформы и приурочена к северной части Воронежского кристаллического массива. В геологическом строении территории принимают участие отложения осадочного чехла палеозойского и мезозойского возраста, сложенные терригенными породами девонской, юрской и меловой систем, а также четвертичные отложения. Под осадочным чехлом залегает дислоцированный докембрийский кристаллический фундамент.

Девонские отложения на описываемой площади развиты повсеместно. Их мощность составляет более 200 м. Сложена девонская система в основном доломитами и доломитизированными известняками, реже встречаются глинистые, мергелистые и песчаные прослои, а также остатки флоры и фауны. Юрский горизонт представлен средней и верхней юрой – батский и келловейский ярусы. Мощность горизонта составляет порядка 50 м. Наибольшее распространение имеют глинистые отложения, а также пески и песчаники с углистыми и растительными остатками. Мощ-

ность меловых отложений достигает 85 м, и представлены они преимущественно известковистыми песками, опоками и опоковидными глинистыми породами, а также трепелами. К меловым отложениям и приурочено Хотынецкое месторождение.

Подстилают продуктивную толщу породы, представленные псечом мелом, относящиеся к туронскому ярусу ( $K_2t$ ), который в свою очередь с несогласием залегает на альб-сеноманских песчаных отложениях нижнего мела ( $K_{1al}+K_2s$ ). Мощность псечевого мела колеблется от 0,5 до 5 м и в среднем составляет 2,5 м.

Хотынецкое месторождение приурочено к верхнему отделу меловой системы, коньякскому и сантонскому ярусам (рис. 1). Морфологически толща трепелов представляет пласт, имеющий сплошное распространение по всей площади участка. Нижняя граница залежи имеет ровную субгоризонтальную поверхность и плавно погружается в юго-западном направлении до 2 м на 1 км. Падение пласта незначительное в юго-западном направлении.

Мощность продуктивной толщи цеолитсодержащих трепелов в среднем составляет 20 м, местами доходит до 40 м. Отличительной чертой Хотынецкого месторождения является то, что полезным компонентом считается сумма минералов группы цеолита, опал-кristобалита и смектита. Их суммарное содержание достигает 80 %. В опал-кristобалитовой фазе преобладает аморфный кремнезем, кristобалит и тридимит присутствуют в незначительном количестве (табл. 1).

Выше продуктивной толщи залегают алевроитские и трепеловидные глины того же возраста. Их средняя мощность составляет 11 м. В связи с низким содержанием полезных компонентов промышленного интереса они не представляют.

Завершают разрез четвертичные отложения, имеющие повсеместное распространение со средней мощностью в 10–15 м. Отложения представлены мореной и водно-ледниковыми отложениями.

#### **Материалы и методы**

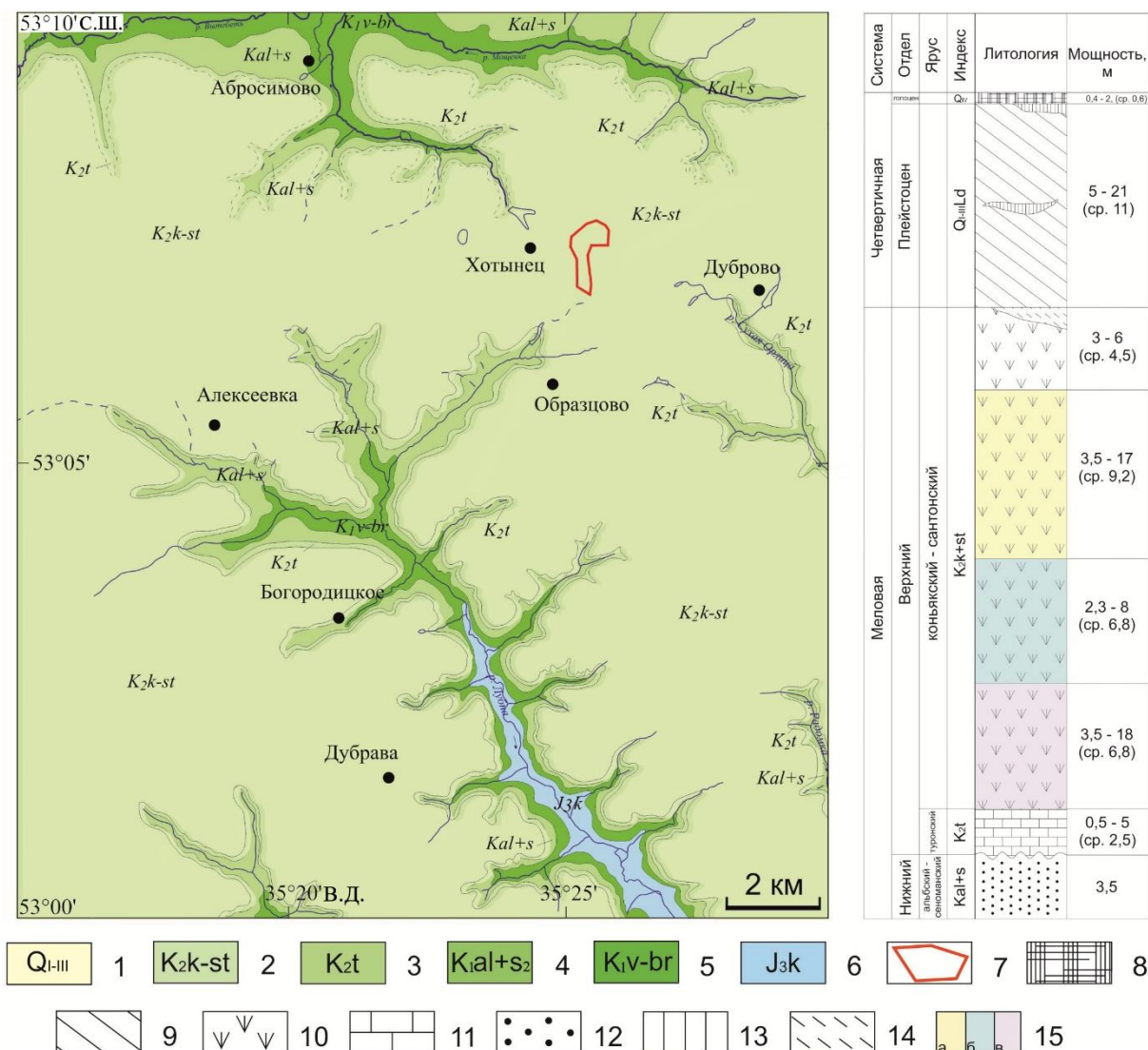
В результате полевых работ авторами было изучено геологическое строение и литологические особенности меловых пород в различных частях карьера. Отобраны образцы пород в средней и нижней продуктивных пачках коньяк-сантонских отложений, обнажающихся в стенках карьера Хотынецкого месторождения. Для детальных исследований минерального состава был выбран наиболее характерный разрез в юго-западной части карьера. На всю глубину средней пачки были исследованы химический и минеральный составы.

Поскольку на момент полевых работ верхняя пачка цеолитсодержащего трепела была уже отработана, а нижняя пачка еще не вскрыта, дополнительно были использованы фондовые материалы по геологоразведочным работам на данном участке [6].

Минеральный состав определялся методом рентгеновской дифракции на дифрактометре ULTIMA-IV (Rigaku, Япония). Рабочий режим – 40 кВ, 40 мА, медное излучение, никелевый фильтр, диапазон из-

мерений 20 3°–65°, полупроводниковый детектор DTex/Ultra. Анализ результатов проводили согласно рекомендациям, описанным в работах [7, 8]. Количе-

ственный минеральный анализ осуществляли методом Ритвельда в программном пакете PROFEX GUI для BGMN.



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта и литологическая колонка Хотынецкого месторождения по материалам [6] с дополнениями. Условные обозначения: 1–6 – стратиграфические отделы и ярусы: 1 – неоплейстоцен (Q<sub>I-III</sub>), 2 – коньякский-сантонский (K<sub>2k</sub>-st), 3 – туронский (K<sub>2t</sub>), 4 – альбский и сеноманский (K<sub>1al</sub>+K<sub>2s</sub>), 5 – валанжинский, готеривский, барремский (K<sub>1v</sub>-br), 6 – келловейский (J<sub>3k</sub>); 7 – контуры лицензионной площади Образцового уч. Хотынецкого месторождения; 8 – почвенно-растительный слой; 9 – суглинок плотный; 10 – трепел цеолитсодержащий; 11 – мел; 12 – песок; 13 – суглинок лессовидный; 14 – супесь; 15 – продуктивная толща: а) верхняя, б) средняя, в) нижняя

**Fig. 1.** Scheme of the geological map and lithological column of the Khotynets deposit based on materials [6] with additions. Symbols: 1–6 – stratigraphic units and stages: 1 – Neopleistocene (Q<sub>I-III</sub>), 2 – Coniacian-Santonian (K<sub>2k</sub>-st), 3 – Turonian (K<sub>2t</sub>), 4 – Albian-Cenomanian (K<sub>1al</sub>+K<sub>2s</sub>), 5 – Valanginian, Hauterivian, Barremian (K<sub>1v</sub>-br), 6 – Callovian (J<sub>3k</sub>); 7 – contours of the license area of the Obratsovsky area of Khotynets deposit; 8 – soil-vegetative layer; 9 – dense loam; 10 – zeolite-containing tripoli; 11 – chalk; 12 – sand; 13 – loess-like loam; 14 – sandy loam; 15 – productive strata: a) upper, b) middle, v) lower

ИК-спектры поглощения были получены при помощи ИК Фурье-спектрометра Spectrum One фирмы Perkin Elmer (США). Съемка образцов производилась в средней области (4000–400 см<sup>-1</sup>) с точностью 100 сканирований/образец и разрешением 4 см<sup>-1</sup>. Для съемки были подготовлены КВг-таблетки (0,5 мг образца к 200 мг КВг). Для исключения вклада адсорбированной

воды препарат помещался в эксикатор с CaCl<sub>2</sub> и прогревался в течение 20–24 ч при температуре 120 °С.

С целью более точного определения содержания аморфного кремнезема в исследуемых образцах был использован метод определения реакционно-способного «аморфного» оксида кремния в соответствии с ГОСТ 5382-2019 [9].

Концентрацию породообразующих химических элементов в пробах определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре последовательного действия Axios Advanced (PANalytical, Нидерланды). Спектрометр снабжен рентгеновской трубкой мощностью 4 кВт с Rh анодом. Максимальное напряжение на трубке – 60 кВ, максимальный анодный ток – 160 мА. Потери при прокаливании (до 1000 °С) определяли в атмосфере воздуха до установления постоянной массы образца.

Площадь удельной поверхности измеряли на установке Quadrasorb SI/Kr. Адсорбцию проводили при температуре жидкого азота (77,35 К). Адсорбентом служил азот с чистотой 99,999 %, для калибровки объема измерительных ячеек использовали гелий марки 6,0 (99,9999 %). Расчет поверхности проводили методом БЭТ по нескольким точкам изотермы в диапазоне P/Ps от 0,05 до 0,30. Образцы предварительно высушивали в вакуумной установке при 100 °С в течение 5–24 ч в зависимости от свойств исходных образцов.

Определение емкости катионного обмена (ЕКО) проводили двумя методами [10]: адсорбцией комплекса Cu(триен) [11, 12] и методом замещения обменных катионов хлоридом аммония [13]. Состав обменных катионов в растворе определяли методом ИСП-МС.

Сорбционные характеристики сорбентов определяли в статических условиях путем непрерывного перемешивания навески воздушно-сухого сорбента массой около 0,1 г, взвешенной с точностью 0,0001 г, с 20 см<sup>3</sup> раствора в течение 48 ч. Затем смесь фильтровали через бумажный фильтр «белая лента» и определяли в фильтрате удельную активность соответствующего радионуклида. По результатам анализов рассчитывали значения коэффициента распределения Kd.

Удельную активность <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в растворах определяли прямым радиометрическим методом с использованием универсального спектрометрического комплекса СКС-50М («Грин стар технолджиз», г. Москва) с использованием гамма-, бета- и альфа-спектрометрического тракта соответственно. Пробы, содержащие <sup>90</sup>Sr, перед измерением выдерживали в течение не менее 14 суток для установления радиоактивного равновесия пары <sup>90</sup>Sr–<sup>90</sup>Y. Перед началом экспериментов в раствор вносили индикаторные количества (~105 Бк/дм<sup>3</sup>) радионуклидов и выдерживали в течение 5 суток для установления гидролитического равновесия между радиоактивными и неактивными компонентами раствора.

Исследование адсорбции катионов меди проводилось в 0,4 % суспензиях сорбентов, в которых создавалась исходная концентрация меди 1 мМ. Адсорбцию проводили в течение 1 ч при механическом перемешивании. Концентрацию меди после адсорбции определяли путем иодометрического титрования 0,01 н раствором тиосульфата натрия. Титр раствора устанавливали по титрованному раствору бихромата калия. Коэффициент распределения рассчитывался как отношение величины адсорбции к равновесной концентрации меди.

Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) проводили на покрытом углеродом (15 нм) образце с использованием микроскопа TESCAN VEGA 3 SBU, оснащенного рентгенофлуоресцентным энергодисперсионным детектором OXFORD X-Max 50, с кристаллическим детектором Si/Li. Ускоряющее напряжение составило 20 кВ при силе тока в диапазоне 3,5–12,2 нА.

## Результаты и обсуждение

Состав и строение продуктивной толщи

цеолитсодержащего трепела Хотынецкого месторождения

*Структурные особенности продуктивной толщи*

Породы продуктивной толщи по разрезу схожи по внешнему виду и составу. Они представлены разностями светло-серого цвета с массивной, толстоплитчатой (рис. 2, а–г) и однородной текстурой (рис. 2, в). Встречаются фрагменты пород с отпечатками двухстворчатых раковин брахиопод (рис. 2, г).

Изучение образцов под просвечивающим оптическим и сканирующим электронным микроскопом показало, что основная часть массы породы имеет алевритовую и алевропелитовую структуру (рис. 3, а, б). Встречаются образцы с сохранившимися остатками диатомовых водорослей и радиолярий, внутренняя поверхность которых выполнена тонкокристаллическим цеолитом (рис. 3, б, в). Основная масса породы представлена глинисто-кремнистой массой с примесью зерен кварца, полевого шпата и карбонатов (рис. 3, а). Клиноптилолит представлен игольчатыми агрегатами длиной в 100–150 мкм (рис. 3, в). По результатам исследования при помощи электронной микроскопии отмечено, что клиноптилолит хорошо раскристаллизован, зачастую встречается в виде гнезд и, по-видимому, заполняет пустоты и поры в общей массе, где имеет вытянутую призматическую форму выделений с размером кристаллов до 20–30 микрон (рис. 3, г). Такая форма выделений клиноптилолита говорит о его образовании на последней стадии формирования толщи, вероятно, на стадии диагенеза в результате растворения глинисто-кремнистой матрицы.

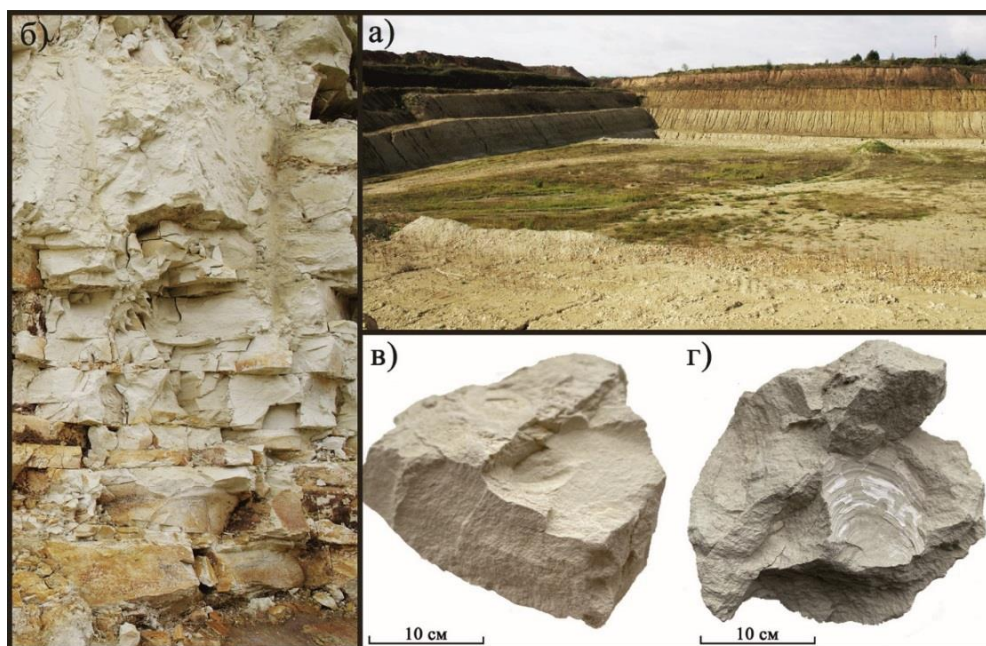
Породы, залегающие в подошве толщи, макроскопически не отличаются от вышезалегающих, однако в изученных прозрачных шлифах отмечается примесь тонкодисперсного кальцита.

*Минеральный и химический состав продуктивной толщи*

По содержанию полезных компонентов, суммы минералов группы цеолита, опал-кristобалита и смектита в пределах продуктивной толщи выделяются три пачки – верхняя, средняя и нижняя.

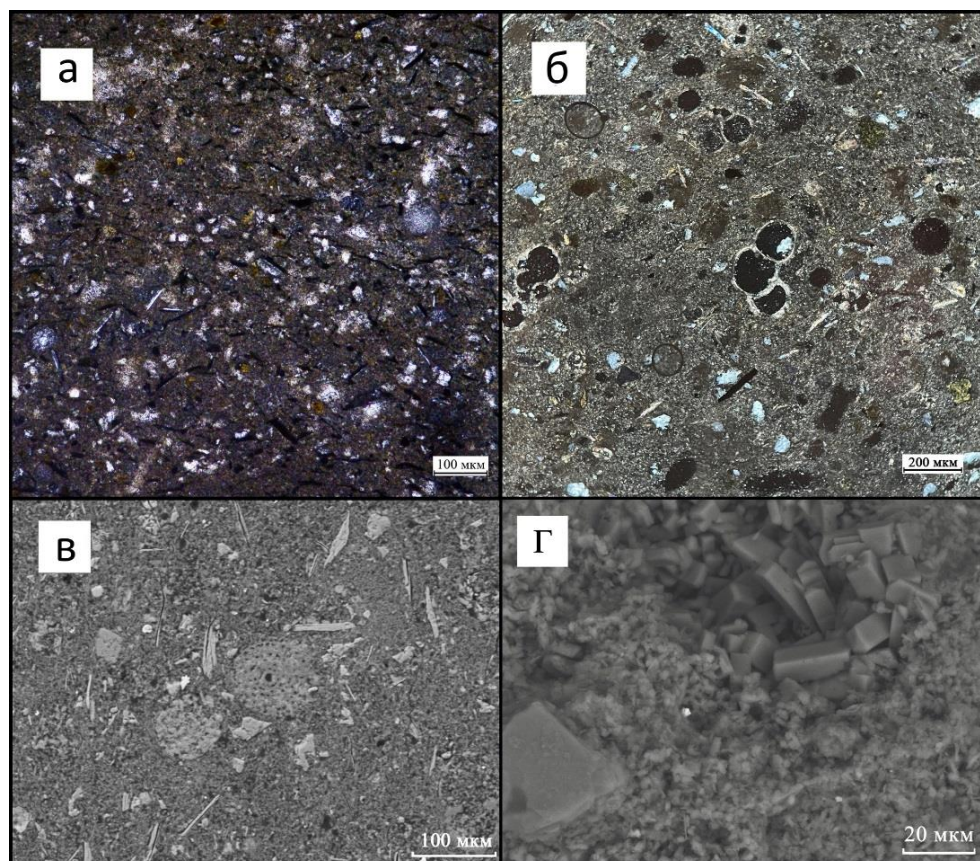
Верхняя и средняя продуктивные пачки схожи по внешнему виду и составу. Мощность верхней и средней пачек составляет 3,5–17 м (ср. 9,2 м) и 2,3–8 м (ср. 6,8 м), соответственно. Минеральные фазы отчетливо определяются методами полнопрофильного анализа рентгеновских дифракционных картин. Содержание полезного компонента в верхней пачке составляет порядка 81 %, в средней пачке – 75–80 % (табл. 1, рис. 4, а). По результатам проведенного минерального анализа (табл. 1) было установлено, что среднее содержание клиноптилолита в верхней пачке составляет 30,6 %.





**Рис. 2.** Обзорная фотография карьера (а), вертикального разреза средней продуктивной пачки (б) и образцов цеолитсодержащего трепела (в, з)

**Fig. 2.** Overview photograph of the mine (a), vertical section of a middle productive bench (b) and samples of zeolite-containing tripoli (v, z)



**Рис. 3.** Микрофотографии цеолитсодержащих трепелов Хотынецкого месторождения: а) обр. 1-1 с алевропелитовой структурой под поляризационным микроскопом (никили скрещены); б) обр. 1-6 с фоссилиями радиолярий и фораминифер (никили скрещены); в) обр. 1-3, со створками диатомовых водорослей; г) обр. 1-1, призматические кристаллы клиноптилолита в глинисто-кремнистой массе

**Fig. 3.** Micrographs of zeolite-containing tripoli from the Khotynets deposit: a) smp. 1-1 with an aleuropelitic structure under a polarizing microscope; б) smp. 1-6 with fossils of radiolarians and foraminifers; в) smp. 1-3 with diatom scallop; г) smp. 1-1 prismatic crystals of clinoptilolite in clay-siliceous mass

В средней пачке содержание клиноптилолита составляет 24–31 %. Среднее содержание смектита в верхней пачке составляет 12,6 %, с глубиной оно возрастает, и в средней пачке содержание смектита составляет 16–24 %. Максимальное содержание аморфного кремнезема приурочено к кровле толщи, где оно достигает 37,6 %. С глубиной его содержание уменьшается. Среднее содержание аморфного кремнезема в средней пачке – 23–32 %. В виде примесей встречается кварц, его содержание колеблется от 8 до 11 %, микроклин (4–8 %), иллит (3–6 %) и анатаз (<1 %). Примесь кальцит практически отсутствует либо не превышает 1 %.

Для более детальной характеристики смектита был снят ИК-спектр поглощения в средней области (рис. 4, б),

который, несмотря на примесь кварца (1086, 797, 784, 695, 514, 472  $\text{см}^{-1}$ ), надежно диагностируется по следующим полосам: валентных колебаний ОН-групп при 3618  $\text{см}^{-1}$ , валентных колебаний Si-O при 1054  $\text{см}^{-1}$  (плечо) и деформационных колебаний, наложенных на аналогичные колебания кварца, при 514 (Al-O-Si) и 472  $\text{см}^{-1}$  (Si-O-Si), деформационных колебаний Al-O и Si-O при 607  $\text{см}^{-1}$ . Данный набор и положение полос характерны для высокоалюминиевых разновидностей диоктаэдрического смектита – монтмориллонита [14].

Нижняя продуктивная пачка имеет светло-серый цвет, в основном однородную текстуру, встречаются отпечатки раковин 54–62 %. Мощность нижней пачки колеблется от 3,5 до 18 м и в среднем составляет 6,8 м.

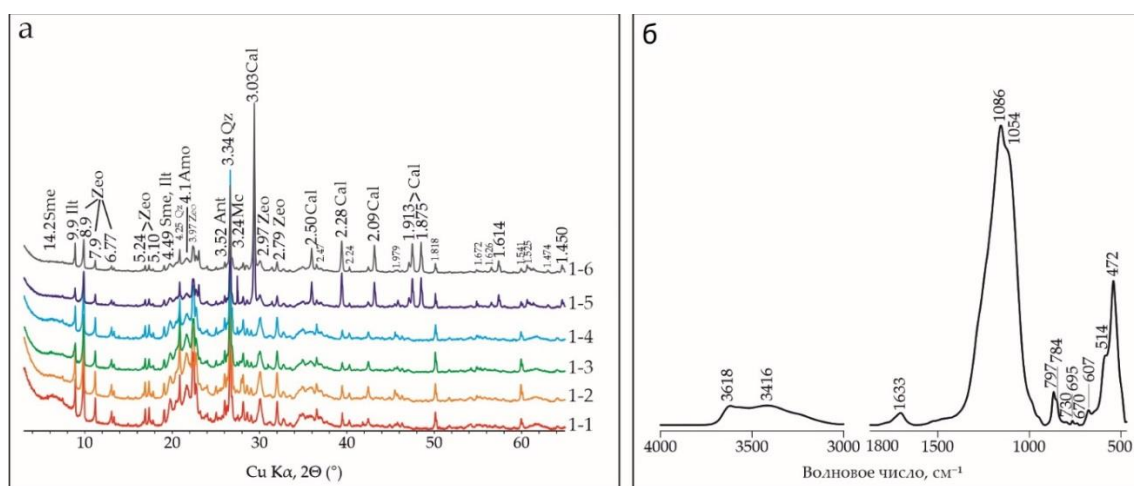


Рис. 4. Рентгенодифракционные картины неориентированных препаратов (а) и ИК-спектр поглощения (б) образцов Хотынецкого месторождения

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of non-oriented preparations (a) and IR absorption spectrum (b) of samples from the Khotynets deposit

Таблица 1. Минеральный состав цеолитсодержащего трепела Хотынецкого месторождения, в вес. %

Table 1. Mineral composition of the zeolite-containing tripoli of the Khotynets deposit, in wt. %

Пачка Bench	Образец Sample	Кварц Quartz	Тридимит Tridymite	Кристобалит Cristobalite	Анатаз Anataz	Микроклин Microcline	Иллит Illite	Кальцит Calcite	Клиноптилолит Clinoptilolite	Смектит Smectite	Аморф SiO <sub>2</sub> Amorphous SiO <sub>2</sub>	Сумма Total**	
Верхняя Upper	Уср*/Average	—							1	30,6	12,6	37,6	81
Средняя Middle	1-1	8,4	1	1,2	0,7	4	6,1	0,4	28	22,4	27,8	80,4	
	1-2	9,9	1,5	1,1	0,6	6,5	3,3	0	26	19,3	31,8	79,7	
	1-3	11	1,9	1	0,4	8	4,9	0,6	24,4	18,9	28,8	75	
	1-4	10,5	1,2	1,2	0,4	6,7	3,5	0	31,5	21,7	23,2	78,8	
Нижняя Bottom	1-5	9,7	1,3	0,5	0,4	6,1	2	27,3	22,1	18,5	12	54,4	
	1-6	8,6	1,5	0,5	0,4	4,5	2,5	28,2	19,5	16,2	18	55,7	
	Уср*/Average	—							22,7	26	7	22,7	60,7

\*по данным геологического отчета [6]; \*\*сумма полезных компонентов.

\*by the data of geological report [6]; \*\*sum of useful components.

Химический состав (табл. 2) образцов хорошо коррелируются с данными по минералогии (табл. 1). Содержание оксида кальция, которое в основном связано с присутствием карбонатов, резко увеличивается в нижней продуктивной пачке. Содержание красящих

оксидов железа и титана не превышает 4,5 % и в основном связано с глинистыми минералами, анатазом, а также пленками оксидов и гидроксидов железа на поверхности кварца и полевых шпатов.

**Таблица 2.** Химический состав образцов цеолитсодержащего трепела Хотынецкого месторождения (мас. %)

**Table 2.** Chemical composition of the samples from the Khotynets deposit (wt. %)

Пачка Bench	№ обр. Sample no.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	MnO	ППП	Сумма Total
Верх/Upper	Уср*/Average	72	0,6	9,8	3,96	3,4	1,26	0,18	1,47	0,083	0,03	0,035	6,9	99,72
Средняя Middle	1-1	71,97	0,50	8,09	3,58	1,98	1,53	0,11	1,50	0,27	<0,01	0,004	10,27	99,80
	1-2	75,75	0,43	6,77	3,13	1,73	1,27	0,10	1,34	0,19	<0,01	0,003	9,12	99,83
	1-3	72,95	0,46	7,33	3,85	2,49	1,35	0,10	1,45	0,56	<0,01	0,014	9,26	99,81
	1-4	67,82	0,53	8,73	4,01	3,53	1,58	0,12	1,65	0,99	<0,01	0,005	10,83	99,80
	1-5	56,92	0,43	6,34	2,61	14,12	1,13	0,12	1,34	0,18	<0,01	0,004	16,61	99,80
	1-6	48,34	0,43	6,91	2,84	18,41	1,04	0,13	1,57	0,28	<0,01	0,015	19,83	99,80
Низ/Bottom	Уср*/Average	55,95	0,37	7,66	2,99	14,25	1,16	0,21	2,23	0,283	<0,01	–	14,90	100,0

\*по данным Г.В. Ковешникова и др. [6].

\*by G.V. Koveshnikov et al. [6].

Пористость и сорбционные свойства трепелов  
Хотынецкого месторождения

Пористость и удельная поверхность

Изучение текстурных особенностей проводилось на наиболее представительном образце цеолитсодержащего трепела № 1-1. Величина удельной поверхности составила оставляет 26,8 м<sup>2</sup>/г (табл. 3). Для образца характерно отсутствие микропор и наличие мезо- и макропор. Подобный эффект отсутствия микропор в бентонитовых глинах ранее отмечался авторами [15]. По размеру пор выделяются три основные группы – от 4 до 12 нм, на них приходится основной объем, от 12 до 23 нм и от 23 до 40 нм.

**Таблица 3.** Пористость и удельная поверхность образца Хотынецкого месторождения

**Table 3.** Porosity and specific surface area of the sample from Khotynets deposit

Образец Sample	Удельная поверхность м <sup>2</sup> /г Specific surface area, m <sup>2</sup> /g	Объем пор, мм <sup>3</sup> Pore volume, mm <sup>3</sup>	Средний диаметр, нм Average diameter, nm	Микропористость (объем), см <sup>3</sup> /г Microporosity (volume), cm <sup>3</sup> /g	Распределение пор по размеру, % Pore size distribution, %	
					Микропоры Micropores	Мезо-макропоры Meso-macropores
1-1	26,8	0,089	7,54	0	0	100

Емкость катионного обмена

Особенностью измерения ЕКО пород, состоящих сразу из нескольких минералов и обладающих способностью к катионному обмену, является то, что в большинстве случаев мы измеряем общую емкость образца. Поскольку в породе Хотынецкого месторождения присутствует как монтмориллонит, так и клиноптилолит, обладающие высокими ионообменными свойствами, было решено провести исследование ЕКО двумя методами, а именно по адсорбции комплекса меди (II) с триэтилентетрамином (Cu-trien) и хлорида аммония.

Хлорид аммония хорошо проникает в межслоевой промежуток монтмориллонита и каналы клиноптилолита, в результате чего этим методом была измерена

общая величина ЕКО. В то же время органическая молекула медного комплекса Cu-trien имеет сравнительно большой размер и не может поместиться в каналах клиноптилолита [14], и этот метод использовался только для определения величины ЕКО глинистой компоненты, которая представлена преимущественно смектитом (монтмориллонитом). Таким образом, вычитая из ЕКО<sub>NH4Cl</sub> значения ЕКО<sub>cu-trien</sub>, можно получить отдельно ориентировочные значения ЕКО клиноптилолита.

Величина ЕКО, измеренная методом адсорбции хлорида аммония, в данном случае принята за общую емкость верхней и нижней пачек и колеблется от 115 до 132 мг-экв/100 г (табл. 4). Обменный комплекс представлен катионами кальция и в меньшей степени магния. Поскольку в образцах 1-5 и 1-6 присутствует большое количество кальцита (табл. 1), определить для них величину ЕКО по хлориду аммония оказалось невозможным, поскольку во время проведения обменной реакции происходило растворение кальцита, что сильно повышало концентрацию катионов кальция в растворе. Величина ЕКО, определенная по комплексу Cu-trien, относится к обменной емкости смектита и составляет от 6 до 18 мг-экв/100 г.

**Таблица 4.** Емкость катионного обмена образцов Хотынецкого месторождения, мг-экв/100 г

**Table 4.** Cation exchange capacity of the samples from the Khotynets deposit, meq/100 g

Образец Sample	ЕКО <sub>мг</sub> , % CEC <sub>MB</sub>	ЕКО <sub>NH4Cl</sub> /CEC <sub>NH4Cl</sub>			
		Total	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> Mg <sup>2+</sup>
1-1	18,4	126,5	1,7	10	96,5 18,3
1-2	10,2	125,1	1,9	9,9	95,7 17,6
1-3	6,7	115,1	2,6	8,7	86,8 17,0
1-4	17,9	131,9	3,7	12,2	92,6 23,4
1-5	12,7	–			
1-6	11,2				

Сорбционные свойства

Поскольку одним из наиболее перспективных направлений использования цеолитсодержащего трепела Хотынецкого месторождения является очистка загрязненных вод, были проведены сорбционные эксперименты по отношению к радионуклидам цезия, стронция и катиону меди. Для сравнения был проанализирован промышленный образец диатомита Инзен-



ского месторождения (Ульяновская обл.), сорбционные свойства которого были ранее исследованы [16].

Проведённые эксперименты показали сравнительно высокую эффективность Хотынецкого цеолитсодержащего трепела по отношению к радионуклиду цезия и катиону меди и довольно низкие показатели по сорбции стронция (табл. 5). Значения  $K_d$  при сорбции цезия в 0,1 и 1 М растворе  $\text{NaNO}_3$  соответствуют 6700 и 1300  $\text{cm}^3/\text{г}$ , в то время как значения  $K_d$  диатомита Инзенского месторождения при тех же условиях составили 2690 и 880  $\text{cm}^3/\text{г}$ , соответственно. Показатели  $K_d$  образца Хотынецкого месторождения при сорбции стронция в 0,01 М растворе  $\text{NaNO}_3$  составило всего 118  $\text{cm}^3/\text{г}$ . Объясняется это тем, что по своей природе основным механизмом связывания цезия является ионный обмен, а для стронция большую роль играет процесс комплексообразования. Кроме того, двухвалентные катионы кальция, которые преобладают в составе обменного комплекса (табл. 4), составляют сильную конкуренцию двухвалентному стронцию. Показатели сорбции меди для образца Хотынецкого месторождения также значительно превысили аналогичные для Инзенского диатомита (1382 против 96  $\text{cm}^3/\text{г}$ ).

Сорбционная активность цеолитсодержащего трепела Хотынецкого месторождения обусловлена уникальным минеральным составом породы, представленным сразу тремя группами минералов с высокими сорбционными характеристиками – цеолитом, смектитом и аморфным кремнеземом. Цеолиты, также известные как молекулярные сита, из-за своей специфической структуры и свойств являются гидратированными каркасными алюмосиликатами с внутрикристаллическими каналами и полостями. Благодаря изоморфным замещениям Si на Al в каналах образуется отрицательный заряд, что и обуславливает высокую ионно-обменную способность цеолитов. Смектиты представляют собой слоистые алюмосиликаты, состоящие из двух тетраэдрических и одной октаэдрической сетки между ними, образуя таким образом слой 2:1. Благодаря широко развитым изоморфным замещениям в октаэдрических (преимущественно) и тетраэдрических сетках (сетках) в структуре слоя появляется отрицательный заряд, который компенсируется межслоевыми катионами и молекулами воды. Такие особенности строения, в совокупности с доступностью для обменных реакций не только внешней, но и внутренней поверхности, обуславливают высокие сорбционные свойства смектитовых минералов и пород, содержащих их в больших количествах. Диатомиты – кремнистые породы, состоящие из остатков диатомовых водорослей. Они сложены минералами аморфного кремнезема (опал, тридимит, кристаллобалит) и обладают низкими обменными свойствами, но высокими показателями удельной поверхности и микропористости.

Все три группы минералов обладают разными механизмами сорбции, что позволяет проводить очистку загрязненных растворов различной природы. Клиноптилолит и смектит (монтмориллонит) являются мощными ионнообменниками, способными эффективно

сорбировать катионы металлов, в особенности радиоактивного цезия. Аморфный кремнезем, за счет своей пористости, в основном обладает физической адсорбцией на поверхности минерала, но также может образовывать комплексы, связанные с силанольными ( $=\text{SiOH}$ ) группами [15].

**Таблица 5.** Значения коэффициента распределения ( $K_d$ )  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $\text{Cu}^{2+}$  на образцах различных месторождений

**Table 5.** Values of the distribution coefficient ( $K_d$ ) of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  and  $\text{Cu}^{2+}$  on samples from different deposits

Месторождение Deposit	Значения $K_d$ , $\text{cm}^3/\text{г}$ / $K_d$ values, $\text{cm}^3/\text{г}$			
	$^{137}\text{Cs}$		$^{90}\text{Sr}$	Дистиллированная вода Distilled water
	0,1 моль/ $\text{dm}^3$ mol/ $\text{dm}^3$	1,0 моль/ $\text{dm}^3$ mol/ $\text{dm}^3$	0,01 моль/ $\text{dm}^3$ mol/ $\text{dm}^3$	
	$\text{NaNO}_3$			
Хотынецкое Khotynets	6700±300	1300±100	118±3	1382±5
Инзенское Inzenskoe	2690±300	880±100	—	96±5

#### Условия образования

Изучению кремнистых пород Восточно-Европейской платформы посвящено множество работ. Большой вклад в их исследование внесли В.И. Муравьев, Г.И. Бушинский, У.Г. Дистанов, В.П. Семенов, Ю.Н. Сеньковский, С.И. Шуменко, А.В. Жабин, А.Д. Савко [17–27] и многие другие ученые и специалисты. Однако условия образования минералов группы цеолита в кремнистых породах до сих пор является дискуссионным вопросом. Имеется несколько подходов, объясняющих подобный парагенез минералов группы опал-кristобалита, цеолита и смектита.

Стоит отметить, что само по себе присутствие цеолитов в подобных кремнистых породах является распространенным явлением и встречается практически на всей территории центральной и южной частей России. Однако содержание цеолитов в большинстве случаев колеблется в пределах первых процентов и редко превышает 10–15 %, в отличие от Хотынецкого месторождения, где содержание клиноптилолита достигает 30 %. Данное месторождение является единственным в своем роде в России, поставленным на государственный баланс как месторождение цеолитов, а не опал-кristобалитового сырья [28].

Как известно, большинство крупных месторождений цеолита связаны с поствулканической деятельностью и образуются в результате разложения пеплового, туфового и терригенного материала в щелочных условиях на стадии диагенеза либо под действием низкотемпературных гидротермальных вод. Одним из основных условий образования цеолитов, в частности клиноптилолита, вулканогенно-осадочного генезиса является наличие источника легкорастворимого кремнезема, низкое соотношение воды и вулканического пепла, избыток свободного кремнезема и достаточное количество магния в растворе, а также щелочная среда с pH от 7,5 до 9 [17, 21].

Генетическая модель, предложенная В.И. Муравьевым [18], предполагает наличие вулканического пепла кислого или среднего состава, отложение кото-

рого происходило на стадии осадконакопления вместе с биогенным кремнеземом. Об образовании цеолитов по вулканическому стеклу свидетельствуют минералы-индикаторы процессов гальмиролиза, такие как кристобалит и монтмориллонит.

Рассматривая вышеописанную модель цеолитообразования, можно выделить как общие черты, присущие всем подобным месторождениям, так и особенности, характерные только для Хотынецкого месторождения. Действительно, во многих месторождения трепела Восточно-Европейской платформы присутствуют реликты вулканического стекла, свидетельствующие о присутствии пеплового материала, по которому образуются цеолиты. Однако в результате изучения толщи цеолитсодержащих трепелов Хотынецкого месторождения такие включения не были обнаружены. Более того, содержание клиноптилолита и прочих минералов цеолитовой группы в подобных месторождениях невелико и обычно не превышает 10 %.

С одной стороны, нельзя исключать наличия какого-то количества вулканического пепла, который в том числе послужил материалом для образования клиноптилолита, поскольку пепловый материал может переноситься на сотни километров. С другой стороны, наличие вулканического пепла не может объяснить столь высокое содержание клиноптилолита в Хотынецком месторождении.

Основным же вопросом является источник щелочной среды, необходимый для растворения вулканического стекла. Минг и Боеттингер [29] предположили, что слабощелочная среда в подобных месторождениях образуется в результате поступления поровых вод, содержащих, к примеру, растворенный  $\text{NaCO}_3$ , но природа таких источников не уточняется.

А.Д. Савко в своих работах [26, 27] связывает образование цеолитсодержащих трепелов Воронежской синеклизы с формированием коры выветривания, а материалом для формирования цеолитов послужил исходный трепел и аллотигенный смектит, который поступал в прибрежные воды с прилегающей суши. В результате поднятия территории в поздние времена происходил размыв более молодых пород. За счет наличия гумусовых кислот, а также растворения  $\text{CO}_2$  pH поверхностных вод понижался, что приводило к растворению подстилающих меловых известняков. Новообразовавшаяся гашеная известь переоткладывалась и создавала условия повышенной щелочности, за счет чего происходило растворение и переотложение растворенного аморфного кремнезема в местах с пониженным рельефом [26]. Образовавшийся избыток щелочи мог бы способствовать последующему образованию минералов цеолитовой группы. При подобном выщелачивании карбонатных толщ образовывались карстовые полости, впоследствии заполнявшиеся вышележащими палеогеновыми отложениями.

В случае Хотынецкого месторождения на исследуемой территории не наблюдается карстовых процессов. Если предположить, что образование цеолита происходило на месте распространения коры вывет-

ривания, в результате разложения известняков поверхностными водами с последующим выделением оксида кальция, то направление миграции новообразованной щелочи было бы сверху вниз и оксид кальция бы мигрировал вниз по разрезу. Но в нашем случае толща карбонатных пород подстилает толщу трепелов, а не перекрывает.

Также стоит отметить, что процессы образования кремнистых осадков, а также распространение кор выветривания имеют площадной характер и распространены на территории всей центральной части европейской платформы, в том числе с наличием карбонатных пород в разрезе. Однако месторождения и проявления цеолитизированного трепела с высоким содержанием цеолитов имеют ограниченное распространение, без пространственной связи с корами выветривания.

В настоящей работе предлагается комбинированная модель, основанная на вторичном преобразовании кремнисто-глинистого материала на стадии диагенеза под действием поступающих глубинных низкотемпературных вод, которые либо являются непосредственным источником водорастворимых щелочей, либо повлияли на разложение подстилающих карбонатных пород с последующим образованием  $\text{OH}^-$  групп, что и привело к повышению pH системы. В отличие от концепции кор выветривания, данная модель предполагает вертикальное (снизу вверх) направление миграции щелочи. Источником же гидротермальных растворов могут являться глубинные разломы в фундаменте Восточно-Европейской платформы. На рис. 5 изображена сводная схема расположения разломов в кристаллическом фундаменте, а также девонские вулканические и рифтогенные структуры, описанные различными исследователями [30–34]. Как видно, Хотынецкое месторождение находится на одном из разломов, а также окружено двумя крупными разломами в кристаллическом фундаменте. Можно предположить, что при активизации тектонических процессов в регионе фильтрация низкотемпературных вод глубинного происхождения проходила через вышележащий осадочный чехол по ранее образованным трещинам и каналам. При этом центры вулканической активности могли находиться на значительном удалении, до тысячи километров, поскольку для фильтрации низкотемпературных вод не требуется сильных механических деформаций осадочных толщ.

В данном случае образование клиноптилолита происходит не по вулканогенному материалу, хотя некоторое его количество может присутствовать в осадках, а по глинисто-кремнистому. Причем образование трепела и смектита хорошо вписывается в классическую генетическую концепцию. Можно выделить несколько основных минералообразующих этапов: снос материала с материка и осадконакопление на морском мелководье, био-хемогенное осаждение кремнезема, диагенез.

Судя по имеющимся палеогеографическим данным (рис. 6) в коньяк-сантонский период верхнего мела в пределах изучаемого района происходила ре-

грессия моря. На более глубоководных участках накапливались карбонаты и мергели, на мелководных участках – кремнистый материал, поступающий с материка в результате выветривания кристаллических пород суши. Это обеспечивалось сносом глинистых минералов, растворенного кремнезема и алюмо-кремнистых гелей с речными стоками. Поступающий кремнезем осаждался за счет диатомовых водорослей. Опресненные воды с близкими к нейтральным значениями pH благоприятно влияли на образование диатомитов с органогенной структурой и высоким содержанием аморфного кремнезема, представленного опалом. Таким образом, на втором этапе происходило био-хемогенное осаждение кремнезема и образование диатомита и трепела в мелководных зонах.

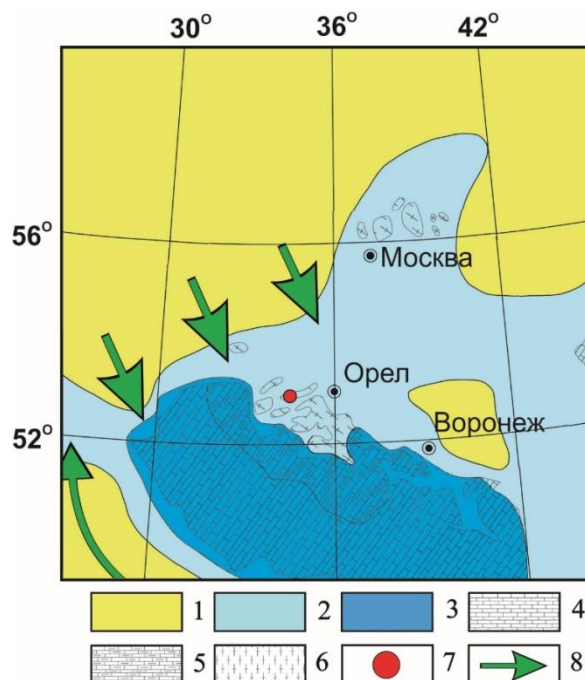


**Рис. 5.** Схема расположения тектонических нарушений в кровле фундамента и девонских вулканических структур Восточно-Европейской платформы [30–34]: 1 – рифтогенные грабены девонского возраста; 2 – девонские вулканические структуры центрального типа; 3а – разломы в кровле Воронежского кристаллического массива; 3б – глубинные разломы в кристаллическом фундаменте; 4 – Хотынецкое месторождение; красным цветом отмечены разломы и структуры, имеющие непосредственное отношение к району исследования

**Fig. 5.** Scheme of location of tectonic faults in the roof of the basement and Devonian volcanic structures of the East European Platform [30–34]: 1 – Devonian rift grabens; 2 – Devonian volcanic structures of the central type; 3a – faults in the roof of the Voronezh crystalline mass; 3b – deep faults in the crystalline basement; 4 – Khotynets deposit. Faults and structures that are directly related to the study area are marked in red

На третьем этапе в результате захоронения и дальнейшей переработки накопленных кремнистых и глинистых осадков на ранних стадиях диагенеза осу-

ществлялся переход биогенного опала в опал-кристобалит и начинались процессы цеолитообразования. Необходимым субстратом для раскристаллизации клиноптилолита служил избыток аморфного кремнезема, находящегося в виде диатомита и трепела, а также натрия, калия и алюминия, источником которых выступали глинистые минералы. Определяющим фактором при образовании цеолитов являлось наличие высокого pH, величина которого не должна быть ниже 8–9. Можно предположить, что повышение pH связано с поступлением глубинных низкотемпературных вод, которые либо содержали водорастворимую щелочь, либо являлись причиной разложения подстилающих карбонатных пород с последующим образованием  $\text{OH}^-$  групп.



**Рис. 6.** Палеогеографическая схема сантонского яруса верхнего мела – палеогена [30]: 1 – суша; 2 – мелководная часть шельфа; 3 – глубоководная часть шельфа; 4 – известняки; 5 – мергель и глинистый известняк; 6 – кремнистые породы; 7 – Хотынецкое месторождение; 8 – направление регрессии моря

**Fig. 6.** Paleogeographic scheme of the Santonian stage of the Upper Cretaceous – Paleogene [30]: 1 – land; 2 – shallow part of the shelf; 3 – deep-water part of the shelf; 4 – limestones; 5 – marl and clayey limestone; 6 – siliceous rocks; 7 – Khotynets deposit; 8 – direction of sea regression

### Заключение

Хотынецкое месторождение цеолитосодержащего трепела расположено в одноименном районе Орловской области и является важным объектом для изучения как с фундаментальной геологической, так и с прикладной точки зрения. Продуктивная толща представлена тремя пачками и приурочена к коньяк-сантонскому ярусу верхнемеловой системы, по минеральному составу в основном состоит из минералов

группы цеолита, опал-кristобалита и смектита с суммарным содержанием до 80 %. Содержание карбонатов заметно увеличивается в нижней подстиляющей пачке.

Емкость катионного обмена верхней и нижней пачки, измеренная методом замещения хлоридом аммония, колеблется от 115 до 132 мг-экв/100 г, обменный комплекс в основном представлен катионами кальция. Удельная поверхность составляет порядка 27 м<sup>2</sup>/г. Для образцов продуктивной толщи характерно отсутствие микропор и наличие мезо- и макропор. Проведенные исследования показали, что цеолитсодержащий трепел Хотынецкого месторождения обладает высокими сорбционными характеристиками по отношению к цезию и может применяться в качестве компонента сорбционных смесей и барьеров для очистки загрязненных вод.

На основании изучения геологического строения месторождения и региона в целом, а также материалов, полученных предшественниками, была предло-

жена комбинированная модель цеолитообразования, включающая как ранее описанные генетические модели, такие как накопление био-хемогенного кремнезема в прибрежных морских водах, снос терригенного глинистого материала с близлежащей суши, его дальнейшее уплотнение и переработка накопленного материала на стадии диагенеза, так и новую модель, которая заключается в том, что образование клиноптилолита связано с повышением pH и растворением опал-кristобалитового и глинистого субстрата в результате вторичного воздействия низкотемпературных глубинных растворов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда, проект № 22-77-10050.*

*Авторы выражают благодарность руководству компании ООО ЦеоТрейдРесурс, в лице Степановой Анны Геннадьевны, а также сотрудникам Хотынецкого месторождения за возможность проведения полевых работ и оказанную помощь.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. U(VI) sorption onto natural sorbents / A. Semenkova, P. Belousov, A. Rzhavskaya, Yu. Izosimova, K. Maslakov, I. Tolpeshta, A. Romanchuk, V. Krupskaya // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2020. – V. 326 (1). – P. 293–301. URL: <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07318-y> (дата обращения 15.12.2022).
2. Carbon and zeolite-based composites for radionuclide and heavy metal sorption / D. Smržová, L. Szatmáry, P. Ecorchard, A. Macháková, M. Maříková, P. Salačová, M. Straka // Heliyon. – 2022. – V. 8 (12). – P. 1–9. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12293> (дата обращения 15.12.2022).
3. Role of pore chemistry and topology in the heavy metal sorption by zeolites: From molecular simulation to machine learning / F.S. Wanyonyi, T.T. Fidelis, G.K. Mutua, F.O. Anthony, M.S. Pembere // Computational Materials Science. – 2021. – V. 195. – P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110519> (дата обращения 15.12.2022).
4. Removal of europium, cobalt and strontium from water solutions using MnO(OH)-modified diatomite / D. Sofronov, M. Rucki, V. Varchenko, E. Bryleva, P. Mateychenko, A. Lebedynskiy // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2022. – V. 10 (1). – P. 1–8. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106944> (дата обращения 15.12.2022).
5. Геолого-структурная позиция месторождений бентонита и цеолита России / П.Е. Белоусов, Н.М. Чупаленков, Н.Д. Карелина, В.В. Крупская // Новое в познании процессов рудообразования. Пороодо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований: Материалы Всероссийской конференции с Международным участием, посвященная 90-летию ИГЕМ РАН. – М., 2020. – С. 826–830.
6. Отчет о результатах работ по объекту «Проведение геолого-разведочных работ по разведке Образцовского участка Хотынецкого месторождения цеолитсодержащих трепелов в Хотынецком районе Орловской области» с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.2011 г. / Г.В. Ковешников, Ю.Б. Кравец, Т.В. Горохова, Н.В. Копейко, Д.А. Шкуратов, В.Н. Федин. Кн. 1. – Орел: Орелгеология, 2010. – 680 с.
7. Дриш В.А., Косовская А.Г. Глинистые минералы: смектиты, смешанослойные минералы. – М.: Наука, 1990. – 214 с.
8. Moore D.M., Reynolds R.C. X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. 2nd ed. – Oxford, UK; New York, NY, USA: Oxford University Press, 1999. – 378 p.
9. ГОСТ 5382-2019. Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа. – М.: Стандартинформ, 2020. – 70 с.
10. Количественные методы определения содержания монтмориллонита в бентонитовых глинах / П.Е. Белоусов, В.В. Покидько, С.В. Закусин, В.В. Крупская // Георесурсы. – 2020. – Т. 22 (3). – С. 38–47. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.38-47>
11. Lorenz P., Meier L., Kahr G. Determination of the cation exchange capacity (CEC) of clay minerals using the complexes of copper (II) ion with triethylenetetramine and tetraethylenepentamine // Clay Clay Miner. – 1999. – V. 47. – P. 386–388.
12. Interlaboratory CEC and exchangeable cation study of bentonite buffer materials: I. Cu(II)-triethylenetetramine method / R. Dohrmann, D. Genske, O. Karnland, S. Kaufhold // Clay Clay Miner. – 2012. – V. 60. – P. 162–175. URL: <https://doi.org/10.1346/CCMN.2012.0600206> (дата обращения 15.12.2022).
13. Tucker B.M. Laboratory procedures for cation exchange measurement on soils. URL: <https://trid.trb.org/view/37268> (дата обращения 15.12.2022).
14. Madejová J., Gates W.P., Petit S. IR spectra of clay minerals // Developments in Clay Science. – 2017. – V. 8. – P. 107–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100355-8.00005-9>
15. Carboniferous bentonites from 10th Khutor deposit (Russia): composition, properties and features of genesis / P. Belousov, N. Chupalnikov, G.E. Christidis, O. Zakusina, S. Zakusin, I. Morozov, M. Chernov, T. Zaitseva, E. Tyupina, V. Krupskaya // Applied Clay Science. – 2021. – V. 3. – P. 1–14.
16. Сорбция радионуклидов <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr и <sup>233</sup>U на различных природных сорбентах / В. В. Милютин, Н.А. Некрасова, П.Е. Белоусов, В.В. Крупская // Радиохимия. – 2021. – Т. 6. – С. 510–516 DOI: 10.31857/S0033831121060022
17. Муравьев В.И., Воронин Б.И. Особенности состава цеолитов глауконитово-кремнистой формации и проблема классификации группы клиноптилолита-гейландита // Литология и полез. Ископаемые. – 1979. – № 2. – С. 75–82.
18. Муравьев В.И. Минеральные парагенезы глауконитово-кремнистых формаций. – М.: Наука, 1983. – 208 с.
19. Муравьев В.И. Вопросы абиогенного осадочного кремнеобразования. Происхождение и практическое использование кремнистых пород. – М.: Наука, 1987. – С. 86–96.
20. Бушинский Г.И., Шуменко С.И. Уточненное определение цеолита из меловых отложений Брянска // Литология и полез. Ископаемые. – 1970. – № 6. – С. 111–114.
21. Фанерозойские осадочные палеобассейны России: проблемы эволюции и минерализации неметаллов / У.Г. Дистанов, Е.М. Аксенов, А.А. Сабитов и др. – М.: Изд-во «Геоинформатика», 2000. – 399 с.
22. Семенов В.П., Асочинский Б.В., Селезнев В.Н. Размещение, генезис и возможности использования кремнистых пород верхнего мела Воронежской антеклизы // Сырьевая база кремнистых пород СССР. – М.: Наука, 1974. – С. 36–40.
23. Сеньковский Ю.Н. Литогенез кремнистых толщ юго-запада СССР. – Киев: Наукова Думка, 1977. – 127 с.

24. Сеньковский Ю.Н. Кремнеаккумуляция в мелу на континентальной окраине тетидной части Европейского блока // Осадочные породы и руды. – Киев: Наукова Думка, 1980. – С. 174–182.
25. Жабин А.В., Дмитриев Д.А. Аутигенное минералообразование в палеоценовых и верхнемеловых отложениях Воронежской антеклизы // Вестник Воронежского ун-та. Сер. Геол. – 2002. – № 1. – С. 84–94.
26. Савко А.Д., Свиридов В.А. Геохимия литогенеза // Материалы Российского совещания. – Сыктывкар, 2014. – С. 206–209.
27. Савко А.Д., Дмитриев Д.А., Свиридов В.А. Фациальный анализ в литологии: теория и практика // Сборник научных материалов Экзолит. – М., 2019. – С. 126–128.
28. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации: «Цеолиты». – М.: Росгеолфонд, 2022. – 19 с.
29. Ming D.W., Boettlinger J.L. Natural zeolites: occurrence, properties, applications. Zeolites in soil environments // Reviews in Mineralogy and Geochemistry / Eds. D.L. Bish, D.W. Ming. – Washington, DC: Mineralogical Society of America and Geochemical Society, 2001. – V. 45. – P. 323–345.
30. Виноградов А.П., Келлер Б.М., Предтеченский Н.Н. Атлас литолого-палеогеографических карт СССР. Т. 1. – М.: Всесоюзный аэрогеологический трест Министерства геологии СССР, 1968. – 55 с.
31. Late Precambrian to Triassic history of the East European Craton: dynamics of sedimentary basin evolution / A. Nikishin, P.A. Ziegler, R. Stephenson, S. Cloetingh, A. Furne, P.A. Fokin, A. Ershov, S. Bolotov, M. Korotaev, A. Alekseev, V. Gorbachev, E. Shipilov, A. Lankreijer, E.Yu. Bembinova, I. Shalimov // Tectonophysics. – 1996. – V. 268. – P. 23–63.
32. Терехов Е.Н., Балувев А.С., Пржиялговский Е.С. Структурное положение и геохимические особенности девонского дайкового магматизма Кольского полуострова // Геотектоника. – 2012. – № 1. – С. 77–94.
33. A Devonian >2000-km-long dolerite dyke swarm-belt and associated basalts along the Urals-Novozemelian fold-belt: part of an East-European (Baltica) LIP tracing the Tuzo Superswell / V. Puchkov, R.E. Ernst, M.A. Hamilton, U. Söderlund, N. Sergeeva // GFF. – 2016. – V. 138 (1). – P. 1–11.
34. Колодяжный С.Ю. Долгоживущие структурные ансамбли Восточно-Европейской платформы Статья 2. Строение кровли фундамента // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2018. – № 3. – С. 5–14.

Поступила: 28.12.2022 г.

Дата рецензирования: 23.01.2023 г.

#### Информация об авторах

**Белоусов П.Е.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук.

**Карелина Н.Д.**, аспирант, стажер-исследователь, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук.

**Морозов И.А.**, аспирант, младший научный сотрудник. Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук.

**Рудмин М.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

**Милютин В.В.**, доктор химических наук, заведующий лабораторией, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН.

**Некрасова Н.А.**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН.

**Румянцева А.О.**, лаборант-исследователь, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук.

**Закусина О.В.**, младший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук.

**Крупская В.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук.

UDC 553.6, 553.21/24

## ZEOLITE-CONTAINING TRIPOLI OF KHOTYNETS DEPOSIT (OREL REGION): MINERAL COMPOSITION, SORPTION PROPERTIES AND FORMATION CONDITIONS

**Petr E. Belousov<sup>1</sup>**,  
belousov.peter@list.ru

**Nadezhda D. Karelina<sup>1</sup>**,  
karelina-98@list.ru

**Ivan A. Morozov<sup>1</sup>**,  
ivan.morozov@yandex.ru

**Maxim A. Rudmin<sup>2</sup>**,  
rudminma@tpu.ru

**Vitaly V. Milyutin<sup>3</sup>**,  
vmilyutin@mail.ru

**Natalia A. Nekrasova<sup>3</sup>**,  
nnekrassova@gmail.com

**Anastasia O. Rumyantseva<sup>1</sup>**,  
rumyantseva.anastasia2017@yandex.ru

**Olga V. Zakusina<sup>1</sup>**,  
o.zakusina@yandex.ru

**Victoria V. Krupskaya<sup>1</sup>**,  
krupskaya@ruclay.com

<sup>1</sup> Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, 35, Staromonetny bystreet, Moscow, 119017, Russia.

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

<sup>3</sup> Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, 31, bld. 4, Leninsky avenue, Moscow, 119071, Russia.

**The relevance** of the work is caused by the need to develop the mineral resource base of high-quality sorption materials in Russia, as well as to study the properties of natural sorbents with a view to their further application in practice.

**The aim** of the work is to study the features of the geological structure, conditions of formation, mineral composition and sorption properties of zeolite-containing tripoli from the Khotynets deposit.

**The object** of the study is the Khotynets deposit of zeolite-containing tripoli, studied by the field team of the Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of Sciences RAS in 2019–2020.

**Methods:** XRD, XRF, FTIR, optical and scanning electron microscopy, determination of SSA and pore size distribution, CEC, experiments on the sorption of cesium, strontium and copper. The paleotectonic reconstruction was carried out as well.

**Results.** The productive strata of the Khotynets deposit consists of three benches, the main useful components of which are minerals of the zeolite, opal-cristobalite and smectite group. Their total content reaches 80 %. The formation of the deposit occurred in three stages and is associated with the primary accumulation of biogenic silica in coastal sea waters, the removal of terrigenous clay material from the nearby land, their further compaction, and processing of the accumulated material at the diagenesis stage. The formation of clinoptilolite is associated with an increase in pH and the dissolution of the opal-cristobalite and clay material as a result of the secondary impact of low-temperature deep solutions. The performed experiments showed that this mineral material has high sorption characteristics with respect to cesium and copper and can be used as a component of sorption mixtures for the purification of polluted waters.

### Key words:

tripoli, zeolite, clay minerals, sorption, genesis, Khotynets deposit, Cretaceous age, Voronezh antecline, Orel region.

The work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-77-10050.

The authors express their gratitude to ZeoTradeResource LLC, represented by Anna G. Stepanova, as well as to the staff of the Khotynets deposit, for the opportunity to carry out field work and provided assistance.

### REFERENCES

1. Semenkova A., Belousov P., Rzhavskaya A., Izosimova Yu., Maslakov K., Tolpeshta I., Romanchuk A., Krupskaya V. U(VI) sorption onto natural sorbents. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2020, vol. 326 (1), pp. 293–301. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07318-y> (accessed 15 December 2022).
2. Smržová D., Szatmáry L., Ecorchard P., Machálková A., Maříková M., Salačová P., Straka M. Carbon and zeolite-based composites for radionuclide and heavy metal sorption. *Heliyon*, 2022, vol. 8 (12), pp. 1–9. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12293> (accessed 15 December 2022).
3. Wanyonyi F.S., Fidelis T.T., Mutua G.K., Anthony F.O., Pembere M.S. Role of pore chemistry and topology in the heavy metal sorption by zeolites: from molecular simulation to machine learning. *Computational Materials Science*, 2021, vol. 195, pp. 1–6. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110519> (accessed 15 December 2022).
4. Sofronov D., Rucki M., Varchenko V., Bryleva E., Mateychenko P., Lebedynskiy A. Removal of europium, cobalt and strontium from water solutions using MnO(OH)-modified diatomite. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, vol. 10 (1), pp. 1–8. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106944> (accessed 15 December 2022).
5. Belousov P.E., Chupalenkov N.M., Karelina N.D., Krupskaya V.V. Geologo-strukturnaya pozitsiya mestorozhdeniy bentonitov i tselolitov Rossii [Geological and structural position of bentonite and zeolite deposits in Russia]. *Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya. Porodo-, mineralo- i rudoobrazovanie: dostizheniya i perspektivy* (2022), vol. 1, pp. 1–10.



- tivy issledovaniy. Materialy Vserossiyskoy konferentsii s Mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoy 90-letiyu IGEN RAN* [New in the knowledge of ore formation processes. Rock-, mineral- and ore formation: achievements and research prospects. Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation, dedicated to the 90th anniversary of IGEN RAN]. Moscow, 2020. pp. 826–830.
6. Koveshnikov G.V., Kravets Yu.B., Gorokhova T.V., Kopeyko N.V., Shkuratov D.A., Fedin V.N. *Otchet o rezultatakh rabot po obektu «Provedenie geologorazvedochnykh rabot po razvedke Obraztsovskogo uchastka Khotynetskogo mestorozhdeniya tseolitosoderzhashchikh trepelov v Khotynetskom rayone Orlovskoy oblasti» s podschetom zasposov po sostoyaniyu na 01.01.2011 g.* [Report on the results of work on the object «Conducting exploration work for the exploration of the Obraztsovsky site of the Khotynets deposit of zeolite-containing tripoli in the Khotynets district of the Oryol region» with the calculation of reserves as of 01.01.2011]. Orel, Orelgeology Publ., 2010. B. 1, 680 p.
7. Drits V.A., Kossovskaya A.G. *Glinistyie mineraly: smektity, smeshanosloynnye mineraly* [Clay minerals: smectites, mixed-layer minerals]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 214 p.
8. Moore D.M., Reynolds R.C. *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford, UK, New York, NY, USA, Oxford University Press, 1999. 378 p.
9. GOST 5382-2019. *Tsementy i materialy taemennogo proizvodstva. Metody khimicheskogo analiza* [State Standard 5382-2019. Cements and materials for cement production. Methods of chemical analysis]. Moscow, StandardInform Publ., 2020. 70 p.
10. Belousov P.E., Pokidko B.V., Zakusin S.V., Krupskaya V.V. Quantitative methods for determining the content of montmorillonite in bentonite clays. *Georesources*, 2020, vol. 22 (3), pp. 38–47. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.38-47>.
11. Lorenz P., Meier L., Kahr G. Determination of the cation exchange capacity (CEC) of clay minerals using the complexes of copper (II) ion with triethylenetetramine and tetraethylenepentamine. *Clay Clay Miner.* 1999, vol. 47, pp. 386–388.
12. Dohrmann R., Genske D., Karnland O., Kaufhold S. Interlaboratory CEC and exchangeable cation study of bentonite buffer materials: I. Cu(II)-triethylenetetramine method. *Clay Miner.* 2012, vol. 60, pp. 162–175. Available at: <https://doi.org/10.1346/CCMN.2012.0600206> (accessed 15 December 2022).
13. Tucker B.M. *Laboratory Procedures for Cation Exchange Measurement on Soils*. Available at: <https://trid.trb.org/view/37268> (accessed 15 December 2022).
14. Madejová J., Gates W.P., Petit S. IR spectra of clay minerals. *Developments in Clay Science*, 2017, vol. 8, pp. 107–149 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100355-8.00005-9>
15. Belousov P., Chupalenkov N., Christidis G.E., Zakusina O., Zakusin S., Morozov I., Chernov M., Zaitseva T., Tyupina E., Krupskaya V. Carboniferous bentonites from 10th Khutor deposit (Russia): composition, properties and features of genesis. *Applied Clay science*, 2021, vol. 3, pp. 1–14.
16. Milyutin V.V., Nekrasova N.A., Belousov P.E., Krupskaya V.V. Sorption of radionuclides <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr and <sup>233</sup>U on various natural sorbents. *Radiochemistry*, 2021, vol. 6, pp. 510–516. DOI: 10.31857/S0033831121060022
17. Muravyov V.I., Voronin B.I. Osobennosti sostava tseolitov glaukonitovo-kremnistoy formatsii i problema klassifikatsii gruppy klinoptilolita-geylandita [Features of the composition of zeolites of the glauconite-siliceous formation and the problem of classification of the clinoptilolite-heulandite group]. *Lithology and Polez. Fossils*, 1979, no. 2, pp. 75–82.
18. Muravyov V.I. *Mineralnye paragenezy glaukonitovo-kremnistykh formatsiy* [Mineral parageneses of glauconite-siliceous formations]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 208 p.
19. Muravyov V.I. *Voprosy abiogenogo osadochnogo kremnenakopleniya. Proiskozhdenie i prakticheskoe ispolzovanie kremnistykh porod* [Issues of abiogenic sedimentary silica accumulation. Origin and practical use of siliceous rocks]. Moscow, Nauka Publ., 1987. pp. 86–96.
20. Bushinsky G.I., Shumenko S.I. Utochnennoe opredelenie tseolita iz melovykh otlozheniy Bryanskaya [Refined definition of zeolite from the Cretaceous deposits of Bryansk]. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 1970, no. 6, pp. 111–114.
21. Distanov U.G., Aksenov E.M., Sabitov A.A. *Fanerozoyskie osadochnyye paleobasseyny Rossii: problemy evolyutsii i minerageniya nemetallov* [Phanerozoic sedimentary paleobasins of Russia: problems of evolution and mineralization of non-metals]. Moscow, Geoinformatics Publ., 2000. pp. 83–96.
22. Semenov V.P., Askochinsky B.V., Seleznev V.N. Razmeshchenie, genezis i vozmozhnosti ispolzovaniya kremnistykh porod verkhnego mela Voronezhskoy anteklizy [Location, genesis and possibilities of using siliceous rocks of the Upper Cretaceous of the Voronezh antecline]. *Syrevaya baza kremnistykh porod SSSR* [Raw materials base of siliceous rocks of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1974. pp. 36–40.
23. Senkovsky Yu.N. *Litogenez kremnistykh tolshch yugo-zapada SSSR* [Lithogenesis of siliceous strata of the southwest of the USSR]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1977. 127 p.
24. Senkovsky Yu.N. Kremnenakoplenie v melu na kontinentalnoy okraine tetidnoy chasti Evropeyskogo bloka [Silica accumulation in the Cretaceous on the continental margin of the tetid part of the European block]. *Osadochnyye porody i rudy* [Sedimentary rocks and ores]. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1980. pp. 174–182.
25. Zhabin A.V., Dmitriev D.A. Autigennoe mineraloobrazovanie v paleotsenovyykh i verkhnemelovykh otlozheniyakh Voronezhskoy anteklizy [Authigenic mineral formation in the Paleocene and Upper Cretaceous deposits of the Voronezh antecline]. *Bulletin of the Voronezh University. Ser. Geol.*, 2002, no. 1, pp. 84–94.
26. Savko A.D., Sviridov V.A. Geokhimiya litogeneza [Geochemistry of lithogenesis]. *Materialy Rossiyskogo soveshchaniya* [Proceedings of the Russian meeting]. Syktyvkar, 2014. pp. 206–209.
27. Savko A.D., Dmitriev D.A., Sviridov V.A. Fatsialny analiz v litologii: teoriya i praktika [Facies analysis in lithology: theory and practice]. *Sbornik nauchnykh materialov Ekzolit* [Collection of scientific materials Exolit]. Moscow, 2019. pp. 126–128.
28. *Gosudarstvennyy balans zasposov poleznykh iskopaemykh Rossiyskoy Federatsii: «Ceolity»* [State balance of mineral reserves of the Russian Federation: «Zeolites»], 2022.
29. Ming D.W., Boettlinger J.L. Natural zeolites: occurrence, properties, applications. Zeolites in soil environments. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. Eds. D.L. Bish, D.W. Ming. Washington, DC, Mineralogical Society of America and Geochemical Society, 2001. Vol. 45, pp. 323–345.
30. Vinogradov A.P., Keller B.M., Predtechenskii N.N. *Atlas litologopaleogeograficheskikh kart SSSR* [Atlas of Lithological and Paleogeographic Maps of the USSR]. Moscow, All-Union Aerogeological Trust of the Ministry of Geology of the USSR, 1968. Vol. 1, 55 p.
31. Nikishin A., Ziegler P.A., Stephenson R., Cloetingh S., Furne A., Fokin P.A., Ershov A., Bolotov S., Korotaev M., Alekseev A., Gorbachev V., Shipilov E., Lankreijer A., Bembinova E.Yu., Shalimov I. Late Precambrian to Triassic history of the East European Craton: dynamics of sedimentary basin evolution. *Tectonophysics*, 1996, vol. 268, pp. 23–63.
32. Terekhov E.N., Baluev A.S., Przhiyalgovskiy E.S. Strukturnoe polozhenie i geokhimicheskie osobennosti devonskogo daykovogo magmatizma Kolskogo poluostrova [Structural position and geochemical features of the Devonian dike magmatism of the Kola Peninsula]. *Geotectonics*, 2012, no. 1, pp. 77–94.
33. Puchkov V., Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Sergeeva N.A. Devonian >2000-km-long dolerite dyke swarm-belt and associated basalts along the Urals-Novozemelian fold-belt: part of an East-European (Baltica) LIP tracing the Tuzo Superswell. *GFF*, 2016, vol. 138 (1), pp. 1–11.
34. Kolodyazhny S.Yu. Long-lived structural ensembles of the East European Platform. Article 2. The structure of the foundation roof. *Proceedings of universities. Geology and exploration*, 2018, no. 3, pp. 5–14. In Rus.

Received: 28 December 2022.

Reviewed: 23 January 2023.

#### Information about the authors

**Petr E. Belousov**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences.

**Nadezhda D. Karelina**, postgraduate student, research assistant, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences.

**Ivan A. Morozov**, postgraduate student, junior researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences.

**Maxim A. Rudmin**, Cand. Sc., assistant professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vitaly V. Milyutin**, Dr. Sc., head of the laboratory, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences.

**Natalia A. Nekrasova**, Cand. Sc., senior researcher, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences.

**Anastasia O. Rumyantseva**, research assistant, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences.

**Olga V. Zakusina**, junior researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences.

**Victoria V. Krupskaya**, Cand. Sc., leading researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences.

УДК 53.043

## НОВЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСАДКО-ГЕЛЕОБРАЗУЮЩИХ МЕТОДОВ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕФТЕОТДАЧИ

Фёдоров Константин Михайлович<sup>1</sup>,  
k.m.fedorov@utmn.ru

Гильманов Александр Янович<sup>1</sup>,  
a.y.gilmanov@utmn.ru

Шевелёв Александр Павлович<sup>1</sup>,  
a.p.shevelev@utmn.ru

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

**Актуальность.** Моделирование выравнивания профиля приёмистости с использованием технологии закачки осадкообразующих и гелеобразующих составов может быть связано с математической задачей с очень малым параметром, при котором объём закачанной в пласт оторочки геля в призабойной зоне нагнетательной скважины значительно меньше расстояния между скважинами. Существующие подходы к моделированию этой задачи не позволяют описать всех эффектов, связанных с малообъёмными закачками.

**Целью** работы является предложение подхода к моделированию и прогнозированию эффективности закачки осадкообразующих и гелеобразующих составов в пласт.

**Объекты:** нефтяные пласты, на которых применяется осадко-гелеобразующие методы увеличения нефтеотдачи.

**Методы.** Новый подход к моделированию такой задачи состоит в объединении задач оптимизации выравнивания профиля приёмистости нагнетательной скважины и прогнозирования реакции окружающих добывающих скважин. Этот подход кратко описан в статье и подтвержден сравнением расчетных данных с результатами статистической обработки данных применения технологий закачки осадкообразующих и гелеобразующих составов в пласты на месторождениях одной из нефтяных компаний.

**Результаты.** Обработка накопленного промыслового опыта применения этих технологий показала, что удельные значения дополнительной добычи нефти после операции выравнивания профиля приёмистости растут с увеличением введённого критерия эффективности обработки – коэффициента выравнивания профиля приёмистости и, наоборот, снижаются при падении коэффициента приёмистости скважины после обработки. Предлагаемый подход к прогнозированию и оценке эффективности применения технологий для контроля обводненности добываемой продукции лежит в основе линейки математических моделей применения технологий гелеобразующих, осадкообразующих и полимер-дисперсных составов.

### Ключевые слова:

физико-химические методы, осадкообразующие составы, гелеобразующие составы, профиль приёмистости, добыча нефти, коэффициент приёмистости.

### Введение

В состав физико-химических методов увеличения нефтеотдачи (МУН) входят технологии контроля обводненности продукции для заводняемых залежей [1], которые обычно называют технологиями выравнивания профиля приёмистости (ВПП) [2, 3]. Суть технологий заключается в закачке осадко-гелеобразующих композиций в нагнетательные скважины [4, 5] и формировании в призабойной зоне слоисто-неоднородного пласта барьеров со сниженной проницаемостью, перераспределяющих потоки закачиваемой воды по вертикали между высоко- и низкопроницаемыми пропластками. Широкое применение заводнения на месторождениях России [6] и мира [7, 8] обуславливает актуальность развития теории и практики применения данных технологий. Практически все российские компании ведут интенсивные исследования в направлении расширения базы осадко-гелеобразующих композиций и совершенствования технологий их применения [9].

Для анализа накопленного опыта отобрана база обработок нагнетательных скважин за последние 5 лет, или 3769 операций. Анализ накопленного опы-

та обобщен в работах [1, 9]. К сожалению, не все случаи информативны, и только 260 операций подлежат полноценной статистической обработке и содержат информацию, необходимую для расчетов. Несмотря на достаточную эффективность применения технологий ВПП, которая составляет в среднем 1600 м<sup>3</sup> на одну обработку, успешность их применения не превышает 70 %, что говорит о том, что современный уровень выбора скважин под обработку и обоснования технологии ВПП еще невелик. В статье приводится статистическая обработка этих данных.

Так как целью применения этой группы методов является контроль обводнения добываемой продукции, а этот класс задач относится к оперативным задачам разработки, то для решения поставленной проблемы требуется применение простых прокси моделей. Секторные модели участков обрабатываемых скважин наиболее полно отражают геологическое строение пластов, однако их создание и применение является дорогостоящей и трудозатратной задачей [10, 11]. Для оперативного решения подобных задач разработки активно развиваются подходы нейросетевого моделирования [12], применения прокси моде-

лей, базирующихся на методе материального баланса [13] и суррогатные модели, соединяющие описание физических процессов и статистических подходов определения взаимосвязи технологических параметров [14]. В статье развивается оригинальный подход, по сути относящийся к суррогатным моделям [15]. Целью работы является создание линейки математических моделей для прогнозирования и оптимизации осадко-гелеобразующих МУН.

#### Линейка математических инструментов для моделирования, прогнозирования и оптимизации осадко-гелеобразующих МУН

Большинство осадко-гелеобразующих технологий ВПП включают два основных компонента: реагент, который дает осадок или формирует гель, и иницирующий компонент. Исключение составляют термотропные составы, где иницирующим компонентом является повышенная температура пласта, и полимер-дисперсные или суспензионные составы, в которых полимер служит для стабилизации суспензии и замедления ее гравитационной сегрегации.

В основе математических моделей, описывающих фильтрацию осадко-гелеобразующих составов в пористой среде, лежат традиционные законы сохранения массы двух основных компонентов с учетом выделения геля или осадка. Фильтрация в пористой среде описывается модифицированным законом Дарси, который учитывает дополнительный фактор сопротивления в зоне выпавшего геля или осадка:

$$U = -\frac{k k_r(S_{or})}{\mu g(\beta, \sigma)} \text{grad } P, \quad (1)$$

где  $U$  – скорость фильтрации;  $k$  – абсолютная проницаемость;  $k_r(S_{or})$  – относительная фазовая проницаемость воды при остаточной нефтенасыщенности;  $\mu$  – вязкость закачиваемого состава;  $P$  – поровое давление;  $g$  – дополнительный фактор сопротивления, зависящий от коэффициента загрязнения  $\beta$  и объемного содержания геля или осадка в данной точке пористой среды  $\sigma$ .

Большинство моделей предлагает линейный закон для зависимости дополнительного сопротивления в (1) от объемной концентрации геля или осадка:

$$g = 1 + \beta \sigma. \quad (2)$$

Рассматривается образование геля или осадка в призабойной зоне нагнетательной скважины в приближении элементарной гомогенной односторонней химической реакции в закрытой системе, протекающей при постоянных объеме и температуре, и описывается законом действующих масс Гульдберга и Вааге [16]:

$$J = \rho_g \frac{\prod_i c_i^{n_i}}{\tau}, \quad (3)$$

где функция  $c_i$  определяет вероятность нахождения в заданной точке пространства необходимого для реакции количества молекул  $i$ -го компонента;  $n_i$  – стехиометрический коэффициент реакции (количество молекул, участвующих в реакции);  $\rho_g$  – плотность геля или осадка;  $\tau$  – характерное время реакции;  $J$  – интенсивность образования массы геля или осадка. Формула (3) позволяет рассчитать распределение  $\sigma$  в призабойной зоне скважин и фактора сопротивления  $g$ .

В случае полимер-дисперсных реагентов или суспензий, основным механизмом которых является захват частиц пористой средой, скорость осаждения принимается пропорциональной модулю потока частиц [17–19]:

$$J = \lambda U c, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – эмпирический коэффициент фильтрации;  $c$  – массовая концентрация частиц в потоке.

С учетом классического закона сохранения массы формула (4) позволяет рассчитать  $\sigma$ .

Конструкции скважин определяют геометрический характер потока. Потоки вблизи вертикальных скважин принято считать плоскорадиальными, а вблизи трещин – плоскопараллельными. Так как при небольших объемах закачки вертикальными перетоками между пропластками можно пренебречь [20], то пропластки пластовой системы можно считать изолированными или пренебречь вертикальными перетоками. При радиальном течении, в отличие от плоскопараллельного, в выражении для дивергенции вектора скорости появляется нелинейность относительно радиальной координаты, и решения для трещины и вертикальной скважины будут различаться [21].

Для наклонно-направленных скважин характерно отклонение потоков от плоскорадиального течения. Чем больше зенитный угол скважины, тем сильнее отклоняются потоки вблизи скважины. Можно принять, что при углах менее  $30^\circ$  этим эффектом можно пренебречь и рассчитывать потоки по аналогии с вертикальными скважинами с учетом изменения площади притока за счет наклона скважины.

Потоки вблизи горизонтальных скважин при анизотропии пласта имеют форму эллипса. Поправки вертикальной и горизонтальной координат с учетом соответствующей проницаемости позволяют свести задачу к радиальной. Принимается, что интервалы вскрытия пропластков с различной проницаемостью пропорциональны их толщине. Эти допущения позволяют применить для расчетов тот же подход, что и в случае вертикальных скважин.

Оценка эффективности ВПП складывается из двух процессов: перераспределения потоков в призабойной зоне скважин и реакции окружающих добывающих скважин на это перераспределение. Следует рассмотреть сначала первый процесс – перераспределение потоков вблизи нагнетательной скважины. Второму процессу будет посвящен раздел валидации разрабатываемого подхода.

Эффективность этого процесса определяется перераспределением потоков, с одной стороны, и падением коэффициента приемистости, с другой стороны. Первый процесс оказывает положительное воздействие, второй – отрицательное.

Перераспределение потоков в результате воздействия можно описать как разность среднеквадратичных отклонений проницаемости в пропластках от среднего значения или коэффициентом ВПП [17]:

$$R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \left( \frac{k_{i1}}{k_a} - 1 \right)^2} - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i \left( \frac{k_{i1}}{k_a} - \frac{k_{a1}}{k_a} \right)^2}, \quad (5)$$

где  $N$  – количество пропластков;  $k_i$  и  $k_{il}$  – значение проницаемости  $i$ -го пропластка до и после осаждения геля или осадка;  $k_a$  и  $k_{al}$  – средние значения проницаемости по всему продуктивному интервалу до и после воздействия. Значения проницаемости пропластков до обработки задаются согласно данным результатов интерпретации геофизических исследований скважин (РИГИС). После обработки рассчитывается дополнительное сопротивление каждого пропластка по формуле (2) с учетом решения для распределения осадка  $\sigma$  в нем, его пористости и мощности.

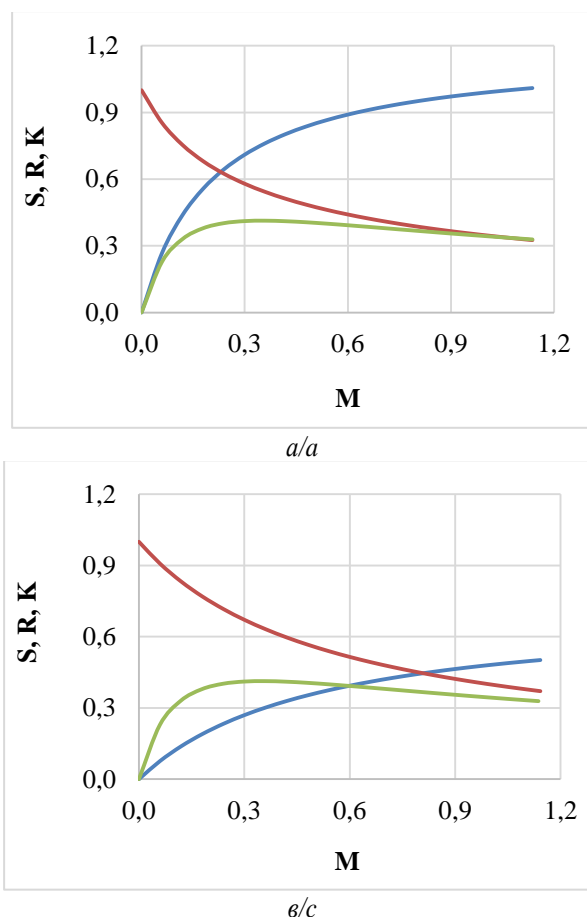
Снижение коэффициента приемистости скважины после загрязнения призабойной зоны гелем или осадком оказывает отрицательный эффект, так как требует дополнительных энергетических затрат на поддержание уровней закачки воды в пласт. Этот эффект определяется через коэффициент падения приемистости нагнетательной скважины или отношением коэффициента приемистости после воздействия к значению коэффициента до воздействия:

$$S = \frac{PI_1}{PI_0}, \quad (6)$$

где  $PI_0$  и  $PI_1$  – коэффициенты приемистости до и после воздействия.

Эффективность первого процесса будет определяться решением оптимизационной задачи о максимальном увеличении перераспределения потоков при минимальном снижении коэффициента ВПП [17]. Можно использовать критерий оптимизации  $K$ , определяемый произведением коэффициента перераспределения потоков (5) и коэффициента падения приемистости (6).

Для примера на рис. 1 представлены расчетные зависимости введенного критерия оптимизации для модельной скважины с семью пропластками с различными фильтрационными параметрами от безразмерной массы закачиваемой оторочки ( $M=0,65$ ) для различных технологий обработки вертикальных нагнетательных скважин с трещинами гидроразрыва пласта (ГРП).



**Рис. 1.** Зависимости критериев эффективности (красные и синие кривые для коэффициентов падения приемистости и перераспределения потоков соответственно) и критерия оптимизации (зелёные кривые) процесса от безразмерной массы закачиваемой оторочки  $M$ : а) для полимердисперсных систем; б) для гелеобразующих составов; в) для осадкообразующих составов

**Fig. 1.** Dependences of the treatment efficiency criteria (red and blue curves for the coefficients of injectivity drop and conformance control, respectively) and process optimization criterion (green curves) on dimensionless mass of injected slug  $M$ : а) for suspensions; б) for gel technologies; в) for precipitation technologies

В большинстве случаев на зависимости критерия оптимизации от безразмерной массы закачки реагента ( $M$ ) выделяется максимум, который определяет оптимальную массу композиции. Исключение составляет применение технологии осадкообразующих составов без трещин ГРП (расчеты не представлены на рис. 1). Для данной технологии оптимальным значением оторочки реагента является выход кривой на «полку» или постоянное значение.

#### Анализ промышленного опыта применения технологий

База исходных данных была разбита по механизму воздействия на пять основных групп (табл. 1): полимердисперсные (ПДС) (глинопоршок, мел), гелеобразующие (ГОС) (на базе полиакриламида и силиката натрия), осадкообразующие (ООС) (на базе силиката натрия), термотропные (ГАЛКА, темпоскрин и др.) и эмульсионные составы (на основе воды и углеводородов). Далее рассматриваются только информативные или кондиционные

операции, по которым имеется полная информация, необходимая для обработки и описанных расчетов. Подавляющее большинство операций падает на применение полимер-дисперсных, гелеобразующих и осадкообразующих составов. Применение эмульсионных и термотропных обработок незначительно, то есть не вышло за рамки опытно-промышленных испытаний и не подлежит статистическому анализу. В горизонтальных скважинах достаточный опыт накоплен только по применению ГОС на основе гелеобразующих полимеров в скважинах без ГРП.

**Таблица 1.** База исходных данных по обработкам ВПП и потокоотклоняющим технологиям, разбитая по технологиям воздействия и конструкции заканчивания скважин

**Table 1.** Database of initial data on conformance control and flow-deflecting technologies, divided by treatment technologies and well completion design

Тип скважины Well type	Вертикальные + наклонно-направленные Vertical + directional		Горизонтальные Horizontal	
	с ГРП with hydraulic fracture	без ГРП without hydraulic fracture	с ГРП with hydraulic fracture	без ГРП without hydraulic fracture
Наличие ГРП Presence of hydraulic fracture				
Полимер-дисперсные составы Suspensions	601	701	1	4
Гелеобразующие составы Gel compositions	107	701	1	124
Осадкообразующие составы Precipitation compositions	112	657	3	31
Термотропные составы Thermotropic compositions	0	45	0	1
Эмульсионные составы Emulsion compositions	0	3	0	1

Анализ данных таблицы позволяет выделить несколько особенностей применения физико-химических методов увеличения нефтеотдачи. В первую очередь можно сделать вывод о том, что в основном такие обработки применяются на вертикальных и наклонно-направленных скважинах как с трещиной ГРП, так и без таких трещин, а также на горизонтальных скважинах без трещин ГРП. Далее будет идти речь только о вертикальных и наклонно-направленных скважинах с ГРП и без него.

Осадкообразующие и гелеобразующие в основном применялись на скважинах без ГРП, а полимер-дисперсные широко используются на скважинах первого и второго типов.

На одном из месторождений Западной Сибири, характеризующихся высокими коэффициентом обводнённости и расценённостью пласта, наибольшую эффективность среди осадкообразующих составов показал реагент на основе 6,7%-го водного раствора силиката натрия с добавлением 3,8%-го раствора хлорида кальция, а среди гелеобразующих составов – реагент на основе 10 % водного раствора силиката натрия с добавлением 9,1%-й соляной кислоты.

На месторождении юга Тюменской области, характеризующемся высокой степенью слоистой неоднород-

ности пластов, наиболее эффективным среди полимер-дисперсных составов оказался реагент на основе глино-порошка с концентрацией дисперсных частиц 3 %. В качестве несущей фазы используется водный раствор полиакриламида с концентрацией полимера 0,5 %.

Термотропные составы были опробованы в качестве пилотного проекта только на одном из месторождений Западной Сибири. В качестве рабочего реагента применялся коммерческий состав ГАЛКА на основе оксида алюминия.

Эмульсионные составы применялись при единичных обработках на одном из месторождений Иркутской области. В качестве рабочего реагента применялся состав на основе 10%-го водного раствора коммерческого продукта Сонэкс-Р с добавлением 13,5%-го водного раствора хлорида кальция.

Далее рассматриваются именно реагенты, показавшие наибольшую эффективность.

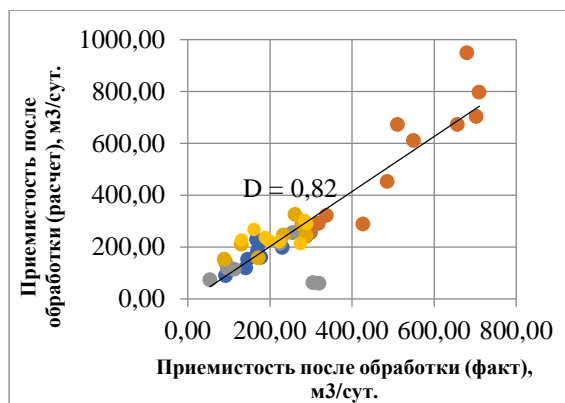
Как указывалось ранее, эффективность применения технологии ВПП для нагнетательной скважины характеризуется двумя параметрами: коэффициентом перераспределения потоков, который является «внутренним» параметром, не определяемым на промысле, и коэффициентом падения приемистости, который замеряется после воздействия. Внутренний параметр характеризует процессы внутри пласта, которые не поддаются точным замерам промыслово-геофизическими исследованиями, характеризующими расходы через интервалы перфорации, которые плохо коррелируют с потоками в пропластках с различной проницаемостью. Хорошо замеряемым параметром является коэффициент приемистости (расход, отнесенный к депрессии).

На рис. 2 представлен кроссплот расчетных, полученных с использованием описанных моделей [21], и фактических значений приемистости после воздействия по всем методам и конструкциям скважин из табл. 1. Кроссплот с достаточной точностью (характеризуемой коэффициентом корреляции  $D$ ) описывается прямой, выходящей из нуля и имеющей наклон  $45^\circ$ , что говорит об обоснованности положений, лежащих в основе развиваемого подхода.

#### Валидация идей, заложенных в новый подход к моделированию осадко-гелеобразующих технологий

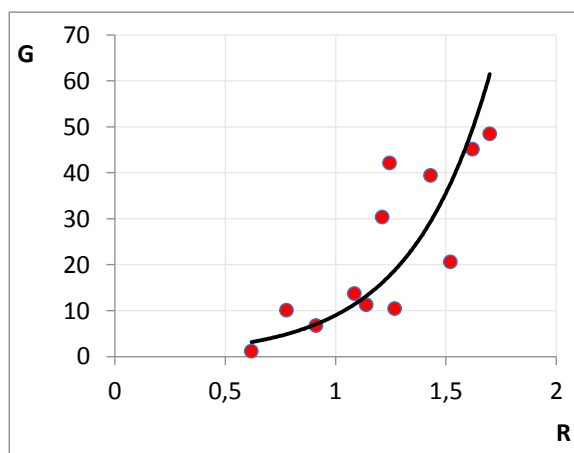
Основным моментом анализа достоверности идей, заложенных в разработанную линейку математических моделей технологий осадко-гелеобразования, является подтверждение влияния сформулированных критериев на дополнительную добычу нефти в результате применения этих технологий. Как показано выше, только накопленный опыт применения технологий ГОС, ПДС и ООС позволяет использовать статистические методы для установления искомых зависимостей. Для общности получаемых результатов необходимо использовать обработку безразмерных параметров, характеризующих дополнительную добычу нефти от введенных ранее безразмерных критериев эффективности процессов. В качестве такого параметра целесообразно использовать безразмерное отношение объема дополнительной добычи на объем закачанной композиции. Можно обозначить его символом  $G$ .



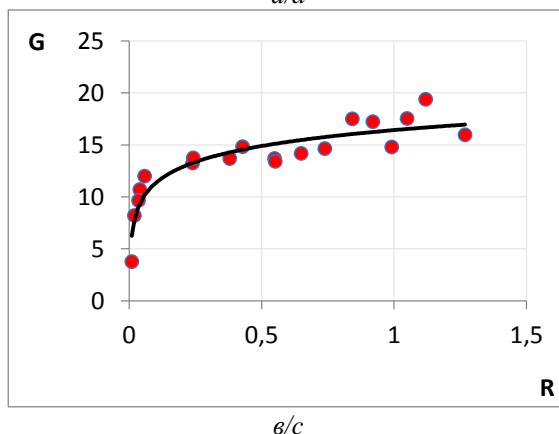


**Рис. 2.** Сопоставление приемистости после обработки, рассчитанной по математической модели [14], с ее фактическим значением (ПДС с ГРП – красные точки, ГОС с ГРП – оранжевые, ГОС без ГРП – фиолетовые, ООС с ГРП – зеленые, ООС без ГРП – синие)

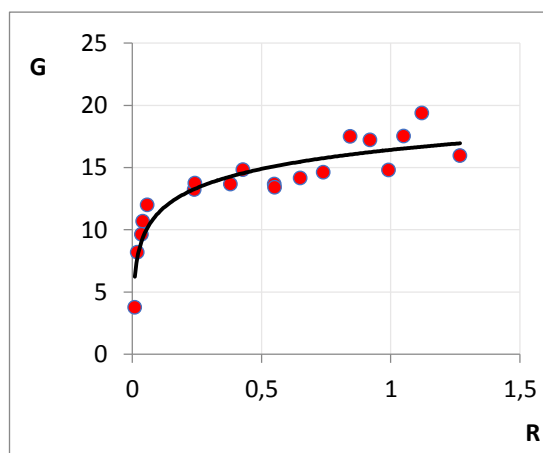
**Fig. 2.** Comparison of the injectivity after treatment, calculated according to the mathematical model [14], with its real value (suspension with hydraulic fracturing is marked with red dots, gel technology with hydraulic fracturing is marked with orange dots, gel technology without hydraulic fracturing is marked with purple dots, precipitation technology with hydraulic fracturing is marked with green dots, precipitation technology without hydraulic fracturing is marked with blue dots)



a/a



б/б



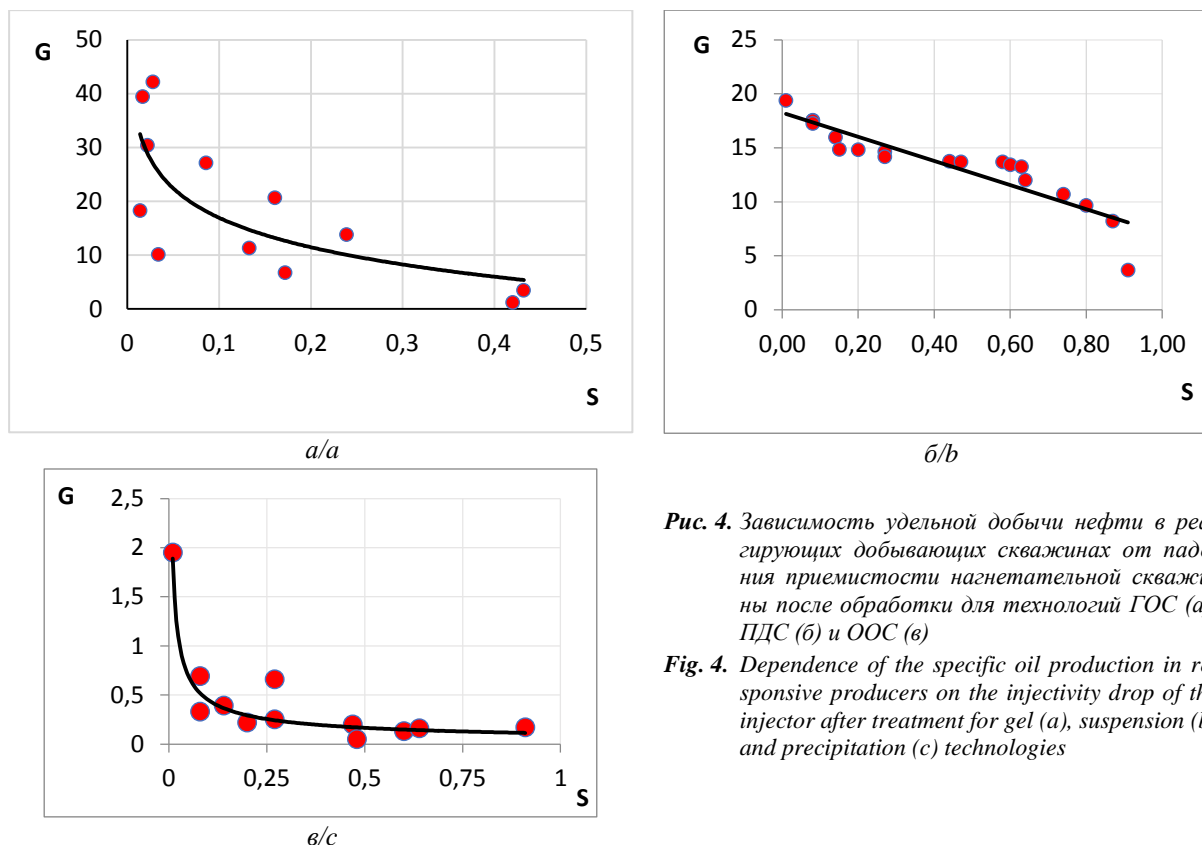
в/в

**Рис. 3.** Результаты статистической обработки взаимосвязи удельных значений дополнительной добычи в реагирующих добывающих скважинах по технологиям ГОС (а), ПДС (б) и ООС (в) от коэффициента ВПП

**Fig. 3.** Results of statistical processing of the dependence of the specific values of additional oil recovery in responsive producers for gel (a), suspension (b) and precipitation (c) technologies on the conformance control coefficient

В основу развиваемого подхода положено описание эффективности перераспределения потоков в пропластках через коэффициент ВПП. Этот критерий должен положительно влиять, соответственно, и на дополнительную добычу нефти. Для подтверждения этой идеи данные по дополнительной добыче для информативных операций, указанных в табл. 1 по вертикальным и наклонно-направленным нагнетательным скважинам, были сопоставлены с результатами расчетов коэффициента ВПП ( $R$ ). Эти расчеты получены на основе данных РИГИС по скважинам, а также параметров обработок (объема, состава композиции и скорости ее закачки). Результаты статистической обработки этих данных для различных технологий представлены на рис. 3. Полученные зависимости характеризуются достаточно высоким коэффициентом корреляции (среднее значение  $D$  равно 0,84, а минимальное – 0,70).

Отрицательным последствием применения осадко-гелеобразующих технологий является снижение коэффициента приемистости нагнетательных скважин, вынуждающее повышать забойные давления для поддержания уровня закачки воды в пласт. Статистическая обработка данных о влиянии введенного коэффициента падения приемистости  $S$  на безразмерную дополнительную добычу нефти для рассматриваемых технологий представлена на рис. 4. Среднее значение коэффициента корреляции этих зависимостей составляет  $D=0,82$ .



**Рис. 4.** Зависимость удельной добычи нефти в реагирующих добывающих скважинах от падения приемистости нагнетательной скважины после обработки для технологий ГОС (а), ПДС (б) и ООС (в)

**Fig. 4.** Dependence of the specific oil production in responsive producers on the injectivity drop of the injector after treatment for gel (a), suspension (b) and precipitation (c) technologies

Высокие значения коэффициентов корреляции установленных зависимостей показывают, что развиваемый подход и модели могут быть положены в основу упрощенных моделей для составления дизайнов обработок, прогнозирования их результатов и оптимизации технологических параметров.

#### Заключение

Анализ накопленного опыта применения технологий ВПП показал, что, несмотря на высокую эффективность применения методов ВПП, успешность этих мероприятий не превышает 70 %. Это указывает на актуальность исследований, включающих как накопленный промысловый опыт, так и развитие упрощенных моделей для прогнозирования процессов.

Предлагается новый подход к прогнозированию и оценке эффективности применения осадкогелеобразующих технологий для контроля обводненности добываемой продукции. Этот подход лежит в

основе линейки математических моделей применения технологий ГОС, ООС и ПДС.

Обработка накопленного промыслового опыта применения технологий показала, что удельные значения дополнительной добычи нефти после операции ВПП растут с увеличением расчетного коэффициента ВПП и, наоборот, снижаются при падении коэффициента приемистости скважины после обработки. Это указывает на положительную апробацию идей, заложенных в развиваемый авторами подход к упрощенному математическому описанию рассматриваемых процессов.

Таким образом, указанная линейка суррогатных моделей может служить для построения дизайна рассмотренных технологий ВПП. Такая процедура позволяет с большей точностью обосновать, а возможно, и оптимизировать применение рассмотренных технологий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ручкин А.А., Ягафаров А.К. Оптимизация применения потокоотклоняющих технологий на Самотлорском месторождении. – Тюмень: Изд-во «Вектор Бук», 2005. – 165 с.
2. Ding B., Shi L., Dong M. Conformance control in heterogeneous two-dimensional sandpacks by injection of oil-in-water emulsion: Theory and experiments // Fuel. – 2020. – V. 273. – № 117751. – P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117751> (дата обращения 15.12.2022).
3. Sagbana P.I., Abushaikh A.S. A comprehensive review of the chemical-based conformance control methods in oil reservoirs // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2021. – V. 11. – № 5. – P. 2233–2257. URL: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01158-6> (дата обращения 15.12.2022).
4. Okeke T., Robert L. Simulation and economic screening of improved oil recovery methods with emphasis on injection profile control including waterflooding, polymer flooding and a thermally activated deep diverting gel // Proceedings of the Society of Petroleum Engineers (SPE) Western Regional Meeting. – Bakersfield, California, USA, 2012. – P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.2118/153740-MS> (дата обращения 15.12.2022).
5. Gelling behavior of PAM/Phenolic crosslinked gel and its profile control in a low-temperature and high-salinity reservoir / F. Ding, C. Dai, Y. Sun, G. Zhao, Q. You, Y. Liu // Gels. – 2022. – V. 8. – № 433. – P. 1–16. URL: <https://doi.org/10.3390/gels8070433> (дата обращения 15.12.2022).
6. Новые перспективы развития химических технологий регулирования охвата пластов заводнением / Р.Н. Фахретдинов, А.А. Фаткуллин, Е.А. Пасанаяев, И.Р. Волгин, Д.Ф. Оразметов //

- Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 8. – С. 65–69. URL: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-8-65-69> (дата обращения 15.12.2022).
7. Aghdam S.K., Kazemi A., Ahmadi M. Theoretical and experimental study of fine migration during low-salinity water flooding: effect of brine composition on interparticle forces // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. – 2022. – V. 25. – № SPE-212852-PA. – P. 1–16. URL: <https://doi.org/10.2118/212852-PA> (дата обращения 15.12.2022).
8. Wang Y., Li X., Lu J. Experimental study of natural ions and rock interactions for seawater breakthrough percentage monitoring during offshore seawater flooding // SPE Journal. – 2021. – V. 26. – № 6. – P. 3949–3969. URL: <https://doi.org/10.2118/201553-PA> (дата обращения 15.12.2022).
9. Земцов Ю.В., Мазаев В.В. Современное состояние физико-химических методов увеличения нефтеотдачи (литературно-патентный обзор). – Екатеринбург: ООО «Издательские решения», 2021. – 240 с.
10. Wilson A. Tengiz field sector model for IOR/EOR process evaluation // Journal of Petroleum Technology. – 2015. – V. 67. – № 1. – P. 81–83. URL: <https://doi.org/10.2118/0115-0081-JPT> (дата обращения 15.12.2022).
11. Построение прокси-модели для расчета уровней добычи нефти в подгазовых зонах пласта / А.А. Гимазов, А.В. Байзитова, С.М. Бикбулатов, И.И. Владимирова, М.А. Шабалин // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 9. – С. 62–64.
12. Управление добычей на основе нейросетевой оптимизации режимов работы скважин на объекте БС8 Западно-Малобалыкского месторождения / Д.А. Рябец, В.В. Бескурский, Л.С. Бриллиант, А.С. Завьялов, Д.В. Горбунова, Е.А. Симаков // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2019. – № 6 (90). – С. 92–98.
13. Создание прокси-интегрированной модели Восточного участка Оренбургского месторождения в условиях недостаточного объема исходных данных / Е.В. Юдин, Р.А. Хабибуллин, И.М. Галяутдинов, Н.А. Смирнов, В.М. Бабин, Г.А. Чигарев // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 12. – С. 47–51. URL: [https://oil-industry.net/Journal/upload/TTN.pdf?ID=11822&art=235133&PA\\_GEN\\_1=2](https://oil-industry.net/Journal/upload/TTN.pdf?ID=11822&art=235133&PA_GEN_1=2) (дата обращения 15.12.2022).
14. A review of surrogate models and their application to groundwater modeling / M.J. Asher, B.F.W. Croke, A.J. Jakeman, L.J.M. Peeters // Water Resources Research. – 2015. – V. 51. – № 8. – P. 5957–5973. URL: <https://doi.org/10.1002/2015WR016967> (дата обращения 15.12.2022).
15. Степанов С.В., Поспелова Т.А. Новая концепция математического моделирования для принятия решений по разработке месторождений // Нефтяное хозяйство. – 2019. – № 4. – С. 50–53. URL: [https://oil-industry.net/Journal/archive\\_detail.php?ID=11462&art=232908](https://oil-industry.net/Journal/archive_detail.php?ID=11462&art=232908) (дата обращения 15.12.2022).
16. Al-Anazi A., Al-Kaidar Z., Wang J. Modeling gelation time of organically crosslinked polyacrylamide gel system for conformance control applications // Proceedings of the Society of Petroleum Engineers (SPE) Russian Petroleum Technology Conference. – Moscow, 2019. – P. 1–18. URL: <https://doi.org/10.2118/196775-MS> (дата обращения 15.12.2022).
17. A theoretical analysis of profile conformance improvement due to suspension injection / К.М. Федоров, А.Я. Гильманов, А.П. Шевелев, А.В. Кобышев, Д.А. Анурьев // Mathematics. – 2021. – V. 9. – № 15. – P. 1727–1741. URL: <https://doi.org/10.3390/math9151727> (дата обращения 15.12.2022).
18. Bedrikovetsky P., Siqueira F.D., Furtado C.A. Modified particle detachment for colloidal transport in porous media // Transport in Porous Media. – 2011. – V. 86. – P. 353–383. URL: <https://doi.org/10.1007/s11242-010-9626-4> (дата обращения 15.12.2022).
19. Herzig J.P., Leclerc D.M., Le Goff P. Flow of suspensions through porous media – application to deep filtration // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 1970. – V. 65. – № 5. – P. 8–35. URL: <https://doi.org/10.1021/ie50725a003> (дата обращения 15.12.2022).
20. Fedorov K.M., Zubkov P.T. Placement of gels in stratified reservoirs using a sequential injection technique // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 1996. – V. 15. – № 1. – P. 69–80. URL: [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(95\)00061-5](https://doi.org/10.1016/0920-4105(95)00061-5) (дата обращения 15.12.2022).
21. Выдыш И.В., Федоров К.М., Анурьев Д.А. Сопоставление эффективности полимер-дисперсных обработок нагнетательных скважин различной конструкции // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2022. – Т. 8. – № 1 (29). – С. 58–74. URL: <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2022-8-1-58-74> (дата обращения 15.12.2022).

Поступила: 29.12.2022 г.

Прошла рецензирование: 13.01.2023 г.

#### Информация об авторах

**Фёдоров К.М.**, доктор физико-математических наук, профессор, научный руководитель Физико-технического института, Тюменский государственный университет.

**Гильманов А.Я.**, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры Моделирования физических процессов и систем, Тюменский государственный университет.

**Шевелёв А.П.**, кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем, Тюменский государственный университет.

UDC 53.043

## NEW APPROACH TO SIMULATION AND EFFICIENCY PREDICTION OF PRECIPITATION AND GEL ENHANCED OIL RECOVERY METHODS

Konstantin M. Fedorov<sup>1</sup>,  
k.m.fedorov@utmn.ru

Aleksandr Ya. Gilmanov<sup>1</sup>,  
a.y.gilmanov@utmn.ru

Aleksandr P. Shevelev<sup>1</sup>,  
a.p.shevelev@utmn.ru

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

**Relevance.** The problem of conformance improvement by precipitation and gel technologies application may be associated with mathematical objective with infinitesimal parameter in which size of gel plug placement in the near wellbore zone of injector is significantly less than interwell distance. Existing approaches to modeling this problem do not allow describing all the effects associated with low-volume injections.

**The objective** of the article is to suggest the approach to simulation and efficiency prediction of precipitation and gel injection technologies.

**Objects:** oil reservoirs on which precipitation and gel enhanced oil recovery methods are used.

**Materials and methods.** New approach to modeling such a problem consists of gluing the optimization objective of injection profile conformance and objective of the prediction of surrounding producers' response. This approach is briefly described in the paper and is validated by the comparison of calculated data with the results of statistical processing of the data of precipitation and gel enhanced oil recovery technologies application on the fields of one of Russian oil companies.

**Results.** Processing of the accumulated field experience in the use of these technologies has shown that the specific values of additional oil production after the operation of conformance improvement grow with the increase in the introduced criterion of processing efficiency – the conformance improvement coefficient and, conversely, decrease with a drop in the well injectivity coefficient after processing. The proposed approach to forecasting and evaluating the effectiveness of the use of technologies to conformance control is the basis of a line of mathematical models for the use of gel, precipitation and suspensions injection technologies.

### Key words:

physico-chemical methods, precipitation, gels, conformance improvement, oil production, injectivity coefficient.

### References

1. Ruchkin A.A., Yagafarov A.K. *Optimizatsiya primeneniya potokootklyayushchikh tekhnologiy na Samotlorskom mestorozhdenii* [Optimization of the application of flow-diverting technologies at the Samotlorskoye field]. Tyumen, Vektor Buk Publ., 2005. 165 p.
2. Ding B., Shi L., Dong M. Conformance control in heterogeneous two-dimensional sandpacks by injection of oil-in-water emulsion: theory and experiments. *Fuel*, 2020, vol. 273, no. 117751, pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117751> (accessed 15 December 2022).
3. Sagbana P.I., Abushaikh A.S. A comprehensive review of the chemical-based conformance control methods in oil reservoirs. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 2233–2257. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13202-021-01158-6> (accessed 15 December 2022).
4. Okeke T., Robert L. Simulation and economic screening of improved oil recovery methods with emphasis on injection profile control including waterflooding, polymer flooding and a thermally activated deep diverting gel. *Proceedings of the Society of Petroleum Engineers (SPE) Western Regional Meeting*. Bakersfield, California, USA, 2012. pp. 1–14. Available at: <https://doi.org/10.2118/153740-MS> (accessed 15 December 2022).
5. Ding F., Dai C., Sun Y., Zhao G., You Q., Liu Y. Gelling behavior of PAM/Phenolic crosslinked gel and its profile control in a low-temperature and high-salinity reservoir. *Gels*, 2022, vol. 8, no. 433, pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.3390/gels8070433> (accessed 15 December 2022).
6. Fakhretudinov R.N., Fatkullov A.A., Pasanayev E.A., Volgin I.R., Orazmetov D.F. New prospects in the development of chemical technologies for regulating the coverage of reservoirs by flooding. *Neftyanoye Khozyaystvo = Oil Industry*, 2022, no. 8, pp. 65–69. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-8-65-69> (accessed 15 December 2022).
7. Aghdam S.K., Kazemi A., Ahmadi M. Theoretical and experimental study of fine migration during low-salinity water flooding: effect of brine composition on interparticle forces. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2022, vol. 25, no. SPE-212852-PA, pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.2118/212852-PA> (accessed 15 December 2022).
8. Wang Y., Li X., Lu J. Experimental study of natural ions and rock interactions for seawater breakthrough percentage monitoring during offshore seawater flooding. *SPE Journal*, 2021, vol. 26, no. 6, pp. 3949–3969. Available at: <https://doi.org/10.2118/201553-PA> (accessed 15 December 2022).
9. Zemtov Yu.V., Mazaev V.V. *Sovremennoe sostoyanie fiziko-khimicheskikh metodov uvelicheniya nefteotdachi (literaturno-patentnyy obzor)* [The current state of physical and chemical enhanced oil recovery methods (literary and patent review)]. Yekaterinburg, LLC Izdatelskie resheniya Publ., 2021. 240 p.
10. Wilson A. Tengiz field sector model for IOR/EOR process evaluation. *Journal of Petroleum Technology*, 2015, vol. 67, no. 1, pp. 81–83. Available at: <https://doi.org/10.2118/0115-0081-JPT> (accessed 15 December 2022).
11. Gimazov A.A., Bayzigitova A.V., Bikbulatov S.M., Vladimirova I.I., Shabalin M.A. Construction of a proxy model to calculate the oil production levels in the reservoir under gas zones. *Neftyanoye khozyaystvo = Oil Industry*, 2010, no. 9, pp. 62–64. In Rus.
12. Ryabec D.A., Beskurskiy V.V., Brilliant L.S., Zavyalov A.S., Gorbunova D.V., Simakov E.A. Upravlenie dobychey na osnove neyrosetevoy optimizatsii rezhimov raboty skvazhin na obekte BS8 Zapadno-Malobalykskogo mestorozhdeniya [Production management based on neural network optimization of well operation modes at the BS8 facility of the Zapadno-Malobalykskoe field]. *Delovoy zhurnal Neftegaz.RU*, 2019, no. 6 (90), pp. 92–98.

13. Yudin E.V., Khabibullin R.A., Galyautdinov I.M., Smirnov N.A., Babin V.M., Chigarev G.A. Creation of a proxy-integrated model of the Eastern section of the Orenburgskoye oil-gas-condensate field under the conditions of lack of initial data. *Neftyanoye khozyaystvo = Oil Industry*, 2019, no. 12, pp. 47–51. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-12-47-51> (accessed 15 December 2022).
14. Asher M.J., Croke B.F.W., Jakeman A.J., Peeters L.J.M. A review of surrogate models and their application to groundwater modeling. *Water Resources Research*, 2015, vol. 51, no. 8, pp. 5957–5973. Available at: <https://doi.org/10.1002/2015WR016967> (accessed 15 December 2022).
15. Stepanov S.V., Pospelova T.A. New concept of mathematical modeling for making reservoir engineering decisions. *Neftyanoye khozyaystvo = Oil Industry*, 2019, no. 4, pp. 50–53. Available at: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2019-4-50-53> (accessed 15 December 2022).
16. Al-Anazi A., Al-Kaidar Z., Wang J. Modeling gelation time of organically crosslinked polyacrylamide gel system for conformance control applications. *Proceedings of the Society of Petroleum Engineers (SPE) Russian Petroleum Technology Conference*. Moscow, Society of Petroleum Engineers, 2019. pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.2118/196775-MS> (accessed 15 December 2022).
17. Fedorov K.M., Gilmanov A.Y., Shevelev A.P., Kobayashv A.V., Anuriev D.A. A theoretical analysis of profile conformance improvement due to suspension injection. *Mathematics*, 2021, vol. 9, no. 15, pp. 1727–1741. Available at: <https://doi.org/10.3390/math9151727> (accessed 15 December 2022).
18. Bedrikovetsky P., Siqueira F.D., Furtado C.A. Modified particle detachment for colloidal transport in porous media. *Transport in Porous Media*, 2011, vol. 86, pp. 353–383. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11242-010-9626-4> (accessed 15 December 2022).
19. Herzig J.P., Leclerc D.M., Le Goff P. Flow of suspensions through porous media – application to deep filtration. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 1970, vol. 65, no. 5, pp. 8–35. Available at: <https://doi.org/10.1021/ie50725a003> (accessed 15 December 2022).
20. Fedorov K.M., Zubkov P.T. Placement of gels in stratified reservoirs using a sequential injection technique. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 1996, vol. 15, no. 1, pp. 69–80. Available at: [https://doi.org/10.1016/0920-4105\(95\)00061-5](https://doi.org/10.1016/0920-4105(95)00061-5) (accessed 15 December 2022).
21. Vidysh I.V., Fedorov K.M., Anuriev D.A. Comparison of the suspension stabilized by polymer treatment efficiency for injection wells of various completions. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2022, vol. 8, no. 1 (29), pp. 58–74. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2022-8-1-58-74> (accessed 15 December 2022).

Received: 29 December 2022.

Reviewed: 13 January 2023.

#### Information about the authors

**Konstantin M. Fedorov**, Dr. Sc., professor, scientific advisor, University of Tyumen.

**Aleksandr Ya. Gilmanov**, Cand. Sc., senior lecturer, University of Tyumen.

**Aleksandr P. Shevelev**, Cand. Sc., associate professor, professor, University of Tyumen.

УДК 622.245.01

## СОПОСТАВИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЧИСЛЕННОГО МЕТОДОВ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОКОЛОСКВАЖИННОЙ ЗОНЫ НА ОСНОВЕ УПРУГОЙ МОДЕЛИ С УЧЕТОМ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СКВАЖИНЫ

Попов Сергей Николаевич<sup>1</sup>,  
popov@ipng.ru

Чернышов Сергей Евгеньевич<sup>2</sup>,  
nirgnf@bk.ru

Кривошеков Сергей Николаевич<sup>2</sup>,  
krivoshchekov@gmail.com

<sup>1</sup> Институт проблем нефти и газа Российской академии наук,  
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, 3.

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью расчета напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны при разработке нефтяных и газовых месторождений для прогноза устойчивости обсадной колонны и сохранности цементного камня.

**Цель:** на основе сопоставительного анализа методов аналитического и численного моделирования расчета напряжений вблизи вертикальной скважины с применением упругой модели определить распределение радиальных и угловых напряжений, сопоставить точность их вычисления разными методами и выявить достоинства и недостатки каждого из них.

**Объекты:** околоскважинная зона терригенного коллектора ачимовских отложений одного из месторождений Ханты-Мансийского автономного округа.

**Методы:** аналитический и численный конечно-элементный методы расчета напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны с учетом основных конструктивных элементов скважины и с использованием линейно-упругой модели.

**Результаты.** Рассмотрены аналитические соотношения, используемые для расчета радиальных и угловых напряжений в колонне, цементном камне и породе-коллекторе, а также уравнения, применяемые при численном конечно-элементном моделировании напряжений вблизи вертикальной скважины. Разработана конечно-элементная схема околоскважинной зоны, включающая ее основные конструктивные элементы. Представлены результаты расчета основных компонент тензора напряжений в конструктивных элементах скважины в зависимости от радиальной координаты для величин забойного давления 20, 40 и 60 МПа. Проведен сопоставительный анализ результатов расчетов напряжений указанными методами. Показано, что наибольшее расхождение между аналитическим и численным методом составило 2 %, что соответствует радиальным напряжениям для варианта расчета с забойным давлением 20 МПа. В среднем расхождения составили: для радиальных напряжений – 0,04 %, для угловых – 0,72 %. Сделан вывод о том, что при использовании модели линейно-упругой среды и при граничных условиях в виде закрепления модели в верхней и нижней части по нормали к поверхности, а также без учета распределения давления в депрессионной воронке модели достаточно использовать аналитический метод расчета. Если же предполагается использовать комбинированные граничные условия, пороупругую модель, учет вязкопластических деформаций, то наиболее предпочтительно использовать метод численного моделирования.

### Ключевые слова:

радиальное и угловое напряжение, аналитический метод, численный метод, метод конечных элементов, забойное давление, скважина, околоскважинная зона.

### Введение

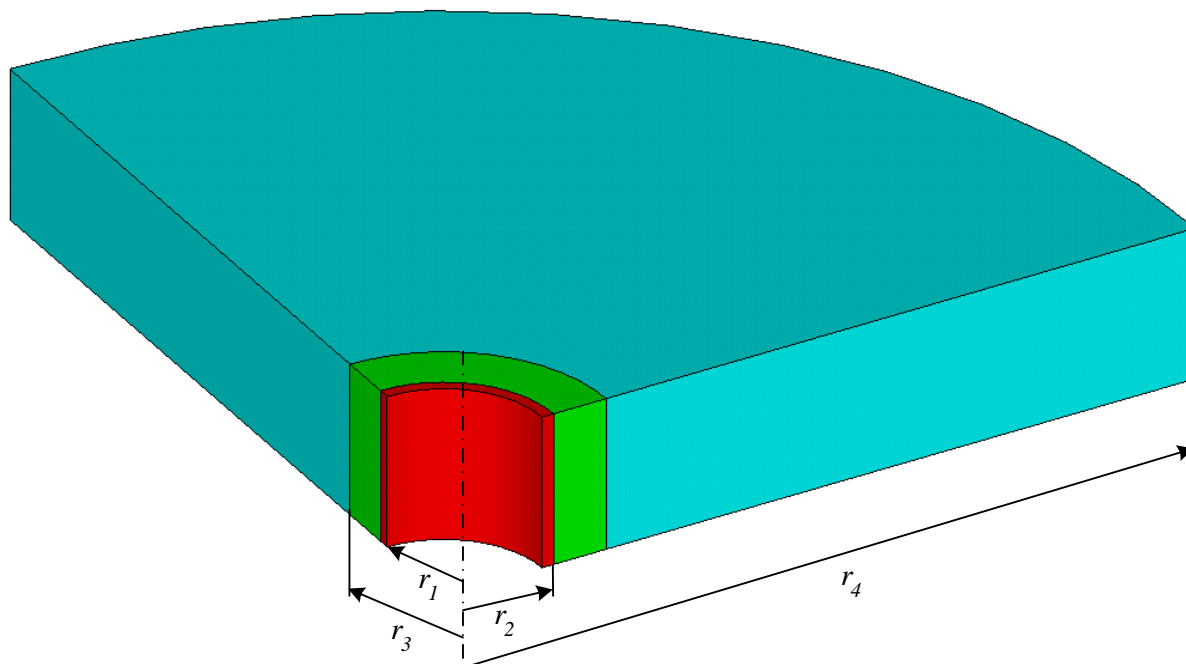
Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) околоскважинной зоны является одним из наиболее распространенных методов прогноза устойчивости нефтяных и газовых скважин [1–5]. Он позволяет определить величины напряжений в основных конструктивных элементах скважин (обсадной колонне, цементном камне) и окружающем массиве горных пород, а также спрогнозировать деформации как открытого, так и закрепленного ствола. На основе информации о величинах напряжений появляется возможность спрогнозировать, не превышают ли они критических значений, приводящих к разрушению

цементного камня, породы или эксплуатационной колонны.

Непосредственно сам расчет НДС осуществляется различными методами, в частности, в последние годы повсеместно применяются методы 1D геомеханического моделирования скважин [6–9], позволяющие определить напряжения на основе совокупного анализа данных геофизических исследований скважин (ГИС), данных о гидроразрыве пласта (ГРП) и лабораторных исследований керна. В таком случае обычно производится расчет напряжений аналитическим методом для условий открытого ствола скважины. Преимущество данного метода – простота и быстрая скорость расчета.

Для более сложных задач, требующих учета большего количества различных факторов (нелинейная упругость, вязкопластические деформации пород, геометрия перфорационных отверстий, изменение свойств цементного камня в процессе его твердения, воздействие на упруго-прочностные свойства различных технологических жидкостей, пластовых флюидов и др.), обычно применяют численные методы расчета, в частности, один из наиболее распространенных методов – метод конечных элементов [10–13]. В рамках данной работы на примере вертикальной скважины

будет выполнен сопоставительный анализ аналитического и численного методов расчета НДС в околоскважинной зоне с учетом эксплуатационной колонны и цементного камня на основе упругой модели (без учета распределения давления флюида в коллекторе). Будет определено, с какой точностью совпадают напряжения в характерных точках расчетной схемы – на стенках обсадной колонны, тампонажного камня и горной породы, а также выявлены достоинства и недостатки рассматриваемых методов расчета.



**Рис. 1.** Схема моделируемой околоскважинной зоны, включающая колонну, цементный камень и участок коллектора:  $r_1$  – внутренний радиус колонны;  $r_2$  – внешний радиус колонны или внутренний радиус цементного камня;  $r_3$  – внешний радиус цементного камня или внутренний радиус участка коллектора;  $r_4$  – внешний радиус участка коллектора

**Fig. 1.** Scheme of the simulated near-wellbore zone, including the casing, cement stone and reservoir section:  $r_1$  is the inner radius of the casing;  $r_2$  is the outer radius of the casing or the inner radius of the cement stone;  $r_3$  is the outer radius of the cement stone or the inner radius of the reservoir section;  $r_4$  is the outer radius of the reservoir section

#### Аналитический метод расчета напряжений в околоскважинной зоне

Первый рассматриваемый метод – аналитический, он основывается на расчете напряжений, представленном в задаче Ламе для толстостенного цилиндра [14–16]. Рассмотрим модель, состоящую из трех вложенных друг в друга цилиндров: участка породы-коллектора, цементной оболочки и обсадной колонны (рис. 1). Радиальные и угловые напряжения для такой модели могут быть определены из следующих соотношений (касательные напряжения  $\tau_{r\theta}$  при этом равны нулю):

$$\sigma_r = -A_i \left( \frac{r_i}{r} \right)^2 + B_i; \sigma_\theta = A_i \left( \frac{r_i}{r} \right)^2 + B_i, \quad (1)$$

где  $r$  – радиальная координата;  $i = 1 \dots 4$  и соответствует внутренней стенке колонны ( $i = 1$ ), контакту колонны и цементного камня ( $i = 2$ ), контакту цементного камня и породы ( $i = 3$ ) и внешнему радиусу обла-

сти коллектора ( $i = 4$ ) (рис. 1);  $A_i$  и  $B_i$  – коэффициенты, определяемые из следующих соотношений:

$$A_i = \frac{\sigma_{ri} - \sigma_{ri-1}}{R_i^2 - 1}; B_i = \frac{R_i^2 \sigma_{ri} - \sigma_{ri-1}}{R_i^2 - 1}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{ri}$  – величина радиальных напряжений;  $R_i^2$  – соотношение характерных радиусов модели  $r_i/r_{i-1}$ .

В соотношении (2)  $\sigma_{r1}$  будет соответствовать давлению в скважине, а  $\sigma_{r4}$  – горизонтальному напряжению на удалении от скважины. В то же время из выражений (1), (2) следует, что неизвестными остаются напряжения на контактах колонна–цемент и цемент–порода. Для их определения применяются уравнения для вычисления радиальных перемещений:

- для внешней стенки элемента модели:
 
$$u_{ri} = \frac{1}{E_i'} \left[ -2 \frac{\sigma_{r-1}}{R_i^2 - 1} + \sigma_{ri} \left( -\nu_i' + \frac{R_i^2 + 1}{R_i^2 - 1} \right) \right] r_i; \quad (3)$$
- для внутренней стенки элемента модели:



$$u_{ri-1} = \frac{1}{E'_i} \left[ 2 \frac{\sigma_{ri} R_i^2}{R_i^2 - 1} - \sigma_{ri-1} \left( v'_i + \frac{R_i^2 + 1}{R_i^2 - 1} \right) \right] r_{i-1}, \quad (4)$$

где  $E'_i$  и  $v'_i$  – преобразованные величины модуля Юнга и коэффициента Пуассона, которые определяются из выражений:

$$E'_i = \frac{E_i}{1 - v_i^2}; \quad v'_i = \frac{v_i}{1 - v_i^2}, \quad (5)$$

где  $E_i$  и  $v_i$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона соответствующих элементов модели.

Неизвестные значения радиальных напряжений на контактах колонна–цемент и цемент–порода вычисляются из условия равенства перемещений на внешней стенке колонны и внутренней стенке цемента (первое уравнение), а также внешней стенке цемента и внутренней стенке области коллектора (второе уравнение). В таком случае из соотношений (3)–(5) получаем два уравнения с двумя неизвестными значениями напряжений. Далее угловые напряжения на контактах элементов модели могут быть определены из следующих выражений:

- для внешней стенки элемента модели:

$$\sigma_{\theta i} = 2 \frac{\sigma_{ri-1}}{R_i^2 - 1} - \sigma_{ri} \frac{R_i^2 + 1}{R_i^2 - 1}, \quad (6)$$

- для внутренней стенки элемента модели:

$$\sigma_{\theta i-1} = -2 \frac{\sigma_{ri} R_i^2}{R_i^2 - 1} - \sigma_{ri-1} \frac{R_i^2 + 1}{R_i^2 - 1}. \quad (7)$$

Подставляя полученные значения для радиальных напряжений на контактах в выражения (1), (2), можно получить целиком картину распределения напряжений во всей моделируемой области.

#### Численный метод расчета напряжений в околоскважинной зоне

При численном методе расчета напряжений вблизи скважины используются три типа уравнений:

- уравнения движения (моментов):

$$\sum_j \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i = 0; \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (8)$$

где  $\sigma_{ji}$  – компоненты тензора напряжений;  $\partial x_j$  – производная по  $j$ -й координате;  $\rho f_i$  – массовые силы;

- геометрические соотношения:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_{ji}$  – компоненты тензора деформаций;  $u$  – компоненты вектора перемещений;

- физические соотношения (в данном случае закон линейной упругости Гука):

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}, \quad (10)$$

где  $\{\sigma\}$  – тензор напряжений;  $[D]$  – матрица упругих констант;  $\{\varepsilon\}$  – тензор деформаций.

При применении метода конечных элементов вышеперечисленные уравнения преобразуются в систему линейных уравнений, которая решается относительно неизвестного вектора перемещений:

$$[K]\{u\} = \{F\}, \quad (11)$$

где  $[K]$  – глобальная матрица жесткости системы;  $\{u\}$  – вектор узловых перемещений модели;  $\{F\}$  – вектор внешних сил.

Далее на основе вычисленного вектора перемещений определяются напряжения и деформации из выражений (9), (10).

Соотношения (8)–(11) реализованы в программном комплексе численного конечно-элементного моделирования ANSYS [17–20]. Для расчетов НДС в данном программном продукте была создана осесимметричная конечно-элементная схема, приведенная на рис. 2. Для более точного вычисления напряжений конечные элементы сгущались вблизи стенок скважины и на контактах цементного камня с колонной и породой, т. к. на этих участках происходит наиболее интенсивное изменение расчетных характеристик.

Модель разбивалась на плоские четырехугольные восьмиузловые конечные элементы plane183 с включенной опцией осесимметричности.

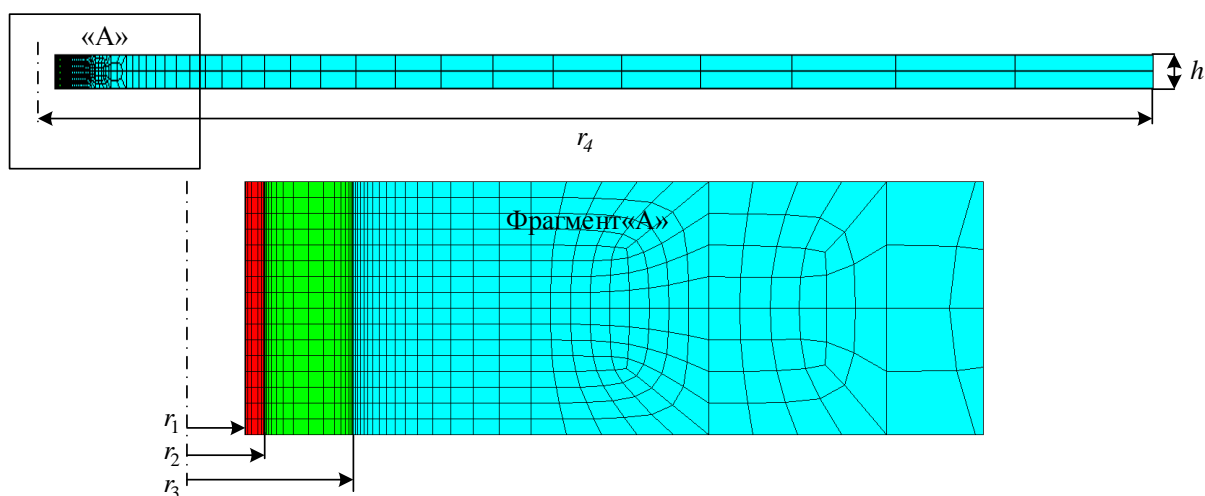


Рис. 2. Осесимметричная конечно-элементная схема, использованная для численных расчетов напряжений в околоскважинной зоне (обозначения радиусов соответствуют рис. 1)

Fig. 2. Axisymmetric finite element scheme used for numerical calculations of stresses in the near-wellbore zone (the notation of the radii corresponds to Fig. 1)

В расчете применялись следующие граничные условия:

1. На верхней и нижней грани закреплялись перемещения по направлению нормали к поверхности.
2. На внутренней стенке колонны прикладывалось давление в скважине.
3. На внешней стенке модели задавалось горизонтальное напряжение.

В результате расчетов были получены графики распределения радиальных и угловых напряжений вдоль радиальной координаты.

#### Сопоставительный анализ результатов аналитического и численного методов расчета напряжений

В табл. 1 приведены исходные данные геометрических и физических характеристик, использованных как при аналитическом, так и при численном моделировании. Для рассматриваемого примера данные величины были взяты на примере ачимовских отложений одного из месторождений Ханты-Мансийского автономного округа.

В расчетах задавалась величина давления в скважине, равная 20, 40 и 60 МПа. При величине 20 МПа предполагалось, что моделируется добывающая скважина, которая эксплуатируется при депрессии 20 МПа. Для забойного давления 40 МПа скважина находится в нерабочем состоянии, депрессия равна нулю. При варианте расчетов с забойным давлением 60 МПа имитируются напряжения вблизи нагнетательной скважины, работающей с репрессией 20 МПа.

На рис. 3 представлены результаты расчетов радиального и углового напряжений, полученные на основе аналитических соотношений (1), (2), (6), (7) и численными методами. Напряжения изменяются вдоль радиальной координаты, и для удобства графики ограничены радиусом 0,3 м, т. к. далее обе компоненты напряжений выполняживаются и стремятся к величине горизонтальных напряжений 50 МПа. Как видно из данного рисунка, радиальные напряжения на контактах имеют излом за счет разных упругих свойств колонны, цемента и породы. В то же время сами значения радиальных напряжений на каждом из контактов имеют одинаковые значения в каждом из соприкасающихся элементов конструкции скважины.

Величины угловых напряжений существенно отличаются от величин радиальных напряжений и имеют разрывы на контактах колонна–цемент и цемент–порода, что также связано с отличием упругих характеристик элементов модели (рис. 3). Максимальные значения компоненты угловых напряжений соответствуют внутренней стенке колонны и получены при давлении в скважине 20 МПа (рис. 3, а).

Как видно из рис. 3, кривые распределения радиального и углового напряжения, полученные двумя рассматриваемыми методами, практически совпадают. Для более точного анализа в табл. 2 приведено сопоставление значений напряжений в характерных точках модели – на внутренней стенке колонны, на контакте колонна–цемент и на контакте цемент–порода.

Из табл. 2 следует, что наилучшее совпадение результатов получено для радиальных напряжений – максимальное расхождение значений составило 0,15 % и в среднем равно 0,04 %. Для угловых напряжений

максимальная разница в результатах расчетов составила 2,03 % и в среднем равна 0,73 %. Таким образом, сопоставительный анализ значений напряжений, полученный аналитическим и численным методом, показывает весьма хорошее совпадение.

**Таблица 1.** Геометрические и физические характеристики модели, используемые в расчетах

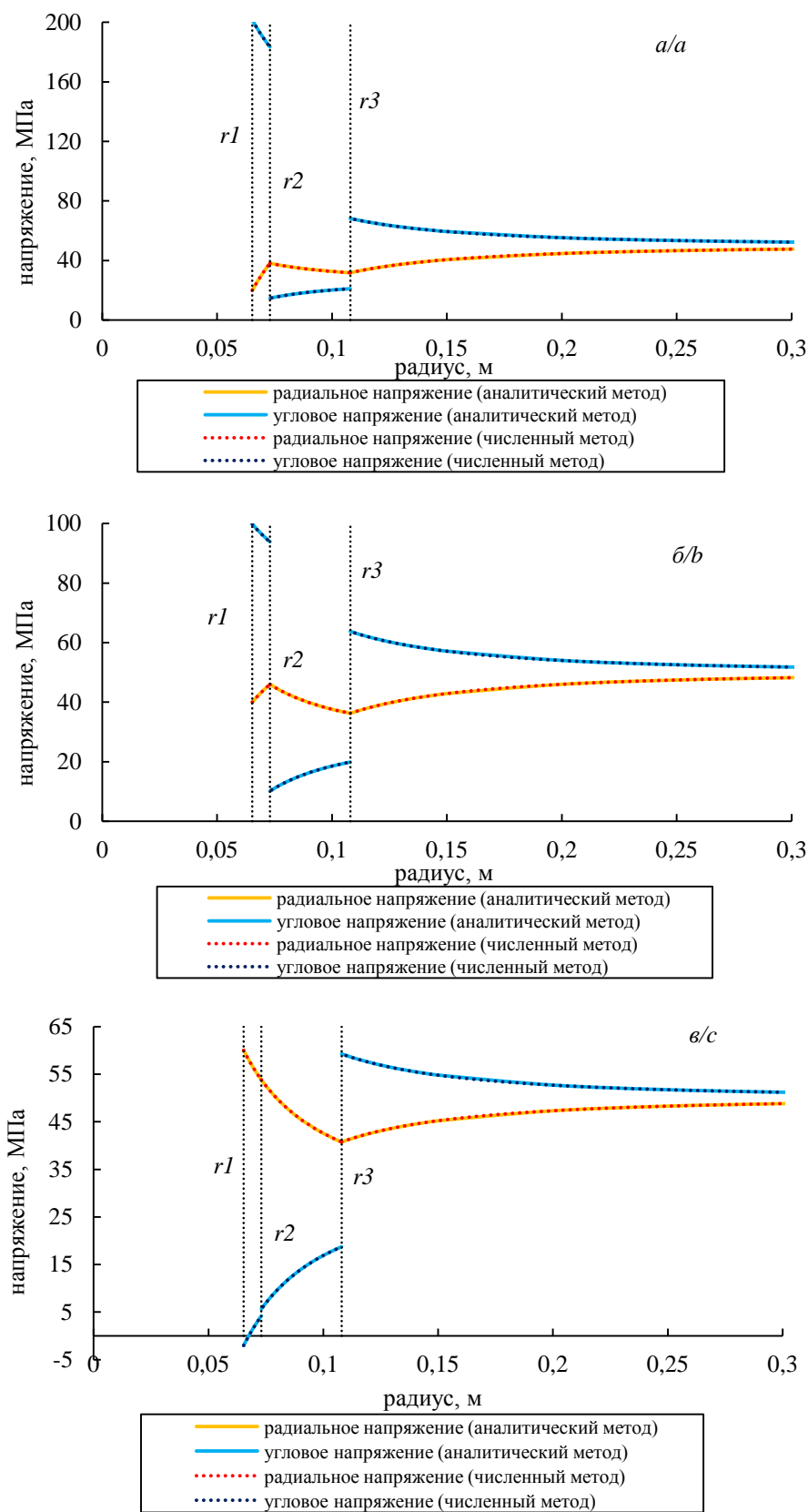
**Table 1.** Geometrical and physical characteristics of the model used in calculations

Характеристика Characteristic	Единицы измерения Units	Значение Value
внутренний радиус колонны inner radius of the casing, $r_1$	мм/mm	65,3
внешний радиус колонны или внутренний радиус цементного камня outer radius of the casing or the inner radius of the cement stone, $r_2$	мм/mm	73
внешний радиус цементного камня или внутренний радиус области коллектора outer radius of the cement stone or the inner radius of the reservoir section, $r_3$	мм/mm	107,95
внешний радиус области коллектора outer radius of the reservoir section, $r_4$	м/m	5
модуль упругости породы elastic module of the rock	ГПа/GPa	40
коэффициент Пуассона породы Poisson's ratio of the rock	д. е./u.f.	0,22
модуль упругости цемента cement elastic module	ГПа/GPa	12,2
коэффициент Пуассона цемента Poisson's ratio of the cement	д. е./u.f.	0,13
модуль упругости колонны casing elastic module	ГПа/GPa	200
коэффициент Пуассона колонны Poisson's ratio of the casing	д. е./u.f.	0,2
горизонтальное напряжение horizontal stress	МПа/MPa	50
забойное давление/bottom hole pressure	МПа/MPa	20, 40, 60

Аналитический метод расчета имеет свои преимущества – в частности, не требуется применение специализированных программных комплексов. В то же время у такого метода есть и свои недостатки:

- 1) не позволяет учесть основные соотношения теории пороупругости, если требуется учесть распределение эффективных напряжений в коллекторе при вариациях пластового и забойного давления;
- 2) если в модели требуется учесть разные граничные условия на верхней или нижней границе, например, когда на породу воздействует нагрузка от вышележащих пластов, а не закрепляют перемещения на ее поверхности;
- 3) не учитывает пластических деформаций породы.

Все вышеперечисленные недостатки компенсируются при использовании численного метода расчета, однако в таком случае требуется доступ к специализированному программному продукту. Также недостатком использования численных методов является чувствительность к используемой конечно-элементной секте, т. е. нужно весьма грамотно задавать распределение конечных элементов, например, вблизи участков с наибольшими градиентами изменения расчетных характеристик иначе могут быть получены результаты, существенно отличающиеся от реальных значений.



**Рис. 3.** Сопоставление распределений радиальных и угловых напряжений в околоскважинной зоне вдоль радиальной координаты, полученных аналитическим и численным методами при забойном давлении: а) 20; б) 40; в) 60 МПа

**Fig. 3.** Comparison of distributions of radial and tangential stresses in the near-wellbore zone along the radial coordinate, obtained by analytical and numerical methods at bottom hole pressure: а) 20; б) 40; в) 60 MPa

**Таблица 2.** Сопоставление величин радиальных и угловых напряжений на характерных участках модели, полученных аналитическим и численным методами

**Table 2.** Comparison of the values of radial and angular stresses in the characteristic areas of the model, obtained by analytical and numerical methods

участок модели/model section	метод/method				разница difference, %	
	аналитический analytical		численный numerical			
	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$
	МПа/MPa					
забойное давление 20 МПа/bottom hole pressure 20MPa						
колонна (внутренняя стенка)/casing (inner wall)	20	201,619	20	201,5	0,00	0,59
колонна (внешняя стенка)/casing (outer wall)	38,147	183,473	38,152	184,14	0,00	1,75
цемент (внутренняя стенка)/cement (inner wall)	38,147	14,706	38,152	14,919	0,03	0,56
цемент (внешняя стенка)/cement (outer wall)	31,786	21,066	31,795	20,99	0,04	0,24
порода (внутренняя стенка)/rock (inner wall)	31,786	68,230	31,795	67,584	0,01	2,03
забойное давление 40 МПа/bottom hole pressure 40MPa						
колонна (внутренняя стенка)/casing (inner wall)	40	99,85	40	99,785	0,00	0,16
колонна (внешняя стенка)/casing (outer wall)	45,98	93,87	45,975	94,065	0,01	0,42
цемент (внутренняя стенка)/cement (inner wall)	45,984	10,156	45,975	10,518	0,09	0,79
цемент (внешняя стенка)/cement (outer wall)	36,262	19,878	36,279	19,783	0,09	0,26
порода (внутренняя стенка)/rock (inner wall)	36,259	63,753	36,279	63,254	0,03	1,38
забойное давление 60 МПа/bottom hole pressure 60MPa						
колонна (внутренняя стенка)/casing (inner wall)	60	−1,991	60	−2,019	0,00	0,05
колонна (внешняя стенка)/casing (outer wall)	53,806	4,202	53,805	3,914	0,02	0,54
цемент (внутренняя стенка)/cement (inner wall)	53,8	5,662	53,805	6,114	0,09	0,84
цемент (внешняя стенка)/cement (outer wall)	40,742	18,726	40,771	18,573	0,15	0,38
порода (внутренняя стенка)/rock (inner wall)	40,743	59,265	40,771	58,916	0,05	0,86
Среднее значение/Average value					0,04	0,72

## Выводы

Рассмотрены результаты определения напряжений в околоскважинной зоне с применением аналитического и численного методов моделирования на основе упругой модели. Полученные результаты позволяют сделать следующие основные выводы:

1. В статье представлены соотношения для расчета напряжений вблизи вертикальной скважины с учетом ее конструктивных элементов аналитическим и численным методами с использованием линейно-упругой модели.
2. На примере конструкции скважины, применяемой для разработки ачимовского продуктивного объекта одного из месторождений Ханты-Мансийского автономного округа, создана конечно-элементная схема для расчета напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны, включающая обсадную колонну, цементную оболочку и участок породы-коллектора вблизи скважины, при этом для более точного расчета задано сгущение конечных элементов на внутренних и внешних стенках элементов модели.
3. Результаты расчетов показали, что для радиальных напряжений характерны изломы кривых распределения радиальных напряжений на контактах колонна–цемент и цемент–порода, что связано с их различающимися упругими характеристиками.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zoback M. D. Reservoir geomechanics. – Cambridge, U.K.: Cambridge University press, 2007. – 505 p.
2. Petroleum related rock mechanics / E. Fjear, R.M. Holt, P. Horsrud, A.M. Raaen, R. Risnes. – Amsterdam: Elsevier, 2008. – 492 p.
3. Попов С.Н. Определение коэффициента запаса прочности цементного камня на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния околоскважинной зоны с

4. Максимальные значения величин напряжений соответствуют угловой компоненте, для которой характерны разрывы графика на контактах колонна–цемент и цемент–порода, что также связано с различием в упругих свойствах элементов конструкции модели.
5. Сопоставительный анализ результатов расчетов аналитическим и численным методами показал их высокое совпадение: среднее отклонение от численного метода составило 0,04 % для радиальных напряжений и 0,72 % для угловой компоненты напряжений.
6. Для расчета напряжений в околоскважинной зоне вертикальной скважины, оценки устойчивости обсадной колонны и сохранности цементного камня на основе линейно-упругой модели может быть использован аналитический метод расчета, однако при учете соотношений пороупругости, нелинейном поведении элементов конструкции скважины или задании неоднородных граничных условий для расчета поля напряжений вблизи скважины требуется применение численных методов, например, метода конечных элементов.

Расчеты выполнены в рамках темы госзадания ИПНГ РАН № FMME – 2022-0008, Рег. № НИОКТР 122022800364-6; анализ и интерпретация данных выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (номер гранта НШ-1010.2022.1.5).

- учетом изменения упруго-прочностных свойств цемента в процессе его твердения и под воздействием кислотного реагента // SOCAR Proceeding. – 2021. – SI № 2. – С. 8–16.
4. Хабибуллин М.А. Исследование механизма разрушения призабойной зоны фильтрационным потоком пластовой жидкости и предотвращения пробкообразования в скважине // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 10. – С. 86–94.

5. Нескормных В.В., Пушмин П.С., Попова М.С. Влияние поверхностно-активных веществ на искривление скважин при бурении в анизотропных горных породах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 9. – С. 146–158.
6. Расчет устойчивости ствола скважины для предотвращения осложнений при бурении / С.В. Лукин, С.В. Есипов, В.В. Жуков, Ю.В. Овчаренко, А.Ю. Хомутов, Т.Н. Шевчук, И.В. Сусляков // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 70–73.
7. Развитие комплексного геомеханического моделирования в ПАО «Газпром нефть» / А.А. Вашкевич, В.В. Жуков, Ю.В. Овчаренко, А.С. Бочков, С.В. Лукин // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 12. – С. 16–19.
8. Talreja R., Bahuguna S., Havelia K. Merits of 3D numerical over 1D analytical geomechanics solution for a complex subsurface // SPE oil and gas conference and Exhibition, Mumbai, 2019. – P. 1–16.
9. Shen X. Integrated workflow for feasibility study of cuttings reinjection based on 3D geomechanics analysis and case study // SPE Asia Pacific drilling technology conference. Virtual, 2021. – P. 1–12.
10. Zienkiewicz O.C. The finite element method. – London: McGraw-Hill, 1977. – 787 p.
11. Settari A., Mourits F. M. A coupled reservoir and geomechanical simulation system // SPE Journal. – 1998. – V. 3. – Iss. 03. – P. 219–226.
12. Settari A., Walters D. A. Advances in coupled geomechanical and reservoir modeling with applications to reservoir compaction // SPE Reservoir Simulation Symposium: Proceedings. – Houston, 1999. – P. 1–13.
13. Попова М.С., Харитонов А.Ю. Компьютерное моделирование процессов, протекающих при бурении скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 12. – С. 18–27.
14. Charlez Ph. Rock mechanics: petroleum applications. – Paris: Editions Technip, 1997. – V. 2. – 661 p.
15. Булатов А.И. Механика цементного камня нефтяных и газовых скважин. – Краснодар: Изд-во Северо-Кавказского отделения инженерной академии РФ, 1994. – 519 с.
16. Ильясов А.М. Оценка прочности цементного кольца, примыкающего к стволу добывающей скважины // Прикладная механика и техническая физика. – 2017. – Т. 58. – № 1. – С. 210–217.
17. Попов С.Н., Чернышов С.Е., Гладких Е.А. Влияние деформаций терригенного коллектора в процессе снижения забойного и пластового давления на изменение проницаемости и продуктивности скважины // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 148–157.
18. Попов С.Н. Геомеханическое моделирование и анализ устойчивости эксплуатационной колонны в условиях частичного отсутствия цементного камня // SOCAR Proceeding. – 2022. – SI № 2. – С. 34–40.
19. Научное обоснование методов вторичного вскрытия факельных отложений юго-востока Пермского края на основании геомеханического моделирования / С.Е. Чернышов, С.Н. Попов, С.В. Варушкин, А.А. Мелехин, С.Н. Кривошеков, Ш. Рен // Записки Горного института. – 2022. – Т. 257. – № 5. – С. 732–743.
20. Повышение эффективности разработки терригенных коллекторов системой ориентированных селективных целевых каналов / С.Е. Чернышов, В.А. Репина, Н.И. Крысин, Д.И.М. Макдоналд // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – № 6. – С. 660–666.

Поступила: 24.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 09.12.2022 г.

#### Информация об авторах

**Попов С.Н.**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией нефтегазовой механики и физико-химии пласта Института проблем нефти и газа Российской академии наук.

**Чернышов С.Е.**, доктор технических наук, исполняющий обязанности заведующего кафедрой нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Кривошеков С.Н.**, кандидат технических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.245.01

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS FOR CALCULATING THE STRESS-STRAIN STATE OF THE NEAR-WELLBORE ZONE BASED ON THE ELASTIC MODEL TAKING INTO ACCOUNT THE MAIN STRUCTURAL ELEMENTS OF THE WELL

**Sergey N. Popov<sup>1</sup>,**  
popov@ipng.ru

**Sergey E. Chernyshov<sup>2</sup>,**  
nirgnf@bk.ru

**Sergey N. Krivoshchekov<sup>2</sup>,**  
krivoshchekov@gmail.com

<sup>1</sup> Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Science,  
3, Gubkin street, Moscow, 119333, Russia.

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the scientific interest in calculating the near-wellbore zone stress-strain state to improve the development of oil and gas fields, to predict the casing stability and the safety of the cement stone.

**The main aim:** based on a comparative analysis of the methods of analytical and numerical simulation of stress calculation near a vertical well using an elastic model, determine the distribution of radial and tangential stresses, compare the accuracy of their calculation by different methods and identify the advantages and disadvantages of each of them.

**Objects:** near-wellbore zone of the terrigenous reservoir of the Achimov deposits of one of the fields of the Khanty-Mansiysk autonomous region.

**Methods:** analytical and numerical finite element methods for stress-strain state calculating of the near-wellbore zone, taking into account the main structural elements of the well and using a linear elastic model.

**Results.** The paper considers the analytical relationships used to calculate the radial and tangential stresses in the casing, cement stone and reservoir rock, as well as the equations used in numerical finite element modeling of stresses near a vertical well. The authors have developed a finite element scheme of the near-wellbore zone, including its main structural elements. The paper introduces the results of calculation of the main components of the stress tensor in the structural elements of the well depending on the radial coordinate for the bottom hole pressure of 20, 40 and 60 MPa. The authors carried out the comparative analysis of the stress calculations results by the methods used. It is shown that the largest discrepancy between the analytical and numerical methods was 2 % that corresponds to radial stresses for the calculation option with a bottom hole pressure of 20 MPa. On average, the discrepancies were: for radial stresses – 0,04 %, for tangential stresses – 0,72 %. It is concluded that when using the model of a linearly elastic medium and under boundary conditions in the form of fixing the model in the upper and lower parts along the normal to the surface, and also without taking into account the pressure distribution in the depression funnel of the model, it is sufficient to use the analytical method of calculation. If it is supposed to use combined boundary conditions, a poroelastic model, taking into account viscoplastic deformations, then it is most preferable to use the numerical simulation method.

### **Key words:**

radial and tangential stresses, analytical method, numerical method, finite element method, bottomhole pressure, well, near-wellbore zone.

Calculations were completed with support of the state task of the OGRI RAS No. FMME-2022-0008, Reg. No. NIOKTR 122022800364-6; data analysis and interpretation were completed with the support of the grant of the President of the Russian Federation for state support of leading scientific schools of the Russian Federation (grant number NSh-1010.2022.1.5)

### **REFERENCES**

1. Zoback M. D. *Reservoir geomechanics*. Cambridge, U.K., Cambridge University press, 2007. 505 p.
2. Fjear E., Holt R.M., Horsrud P., Raaen A.M., Risnes R. *Petroleum related rock mechanics*. Amsterdam, Elsevier, 2008. 492 p.
3. Popov S.N. Determination of the safety factor of cement stone based on numerical modeling of the stress-strain state of the near-wellbore zone, taking into account the change in the elastic-strength properties of cement during its hardening and under the influence of an acid reagent. *SOCAR Proceeding*, 2021, S.I. no. 2, pp. 8–16. In Rus.
4. Khabibullin M.Ya. Research of a reservoir bottom zone destruction by filtering flow of the formation liquid and prevention of call formation in the well. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 10, pp. 86–94. In Rus.
5. Neskromnykh V.V., Pushmin P.S., Popova M.S. Influence of surfaces on boring of wells while drilling in anisotropic rocks. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 9, pp. 146–159. In Rus.
6. Lukin S.V., Esipov S.V., Zhukov V.V., Ovcharenko Yu.V., Khomutov A.Yu. Shevchuk T.N., Suslyakov I.V. Borehole stability prediction to avoid drilling failures. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2016, no. 6, pp. 70–73. In Rus.
7. Vashkevich A.A., Zhukov V.V., Ovcharenko Yu.V., Bochkov A.S., Lukin S.V. Development of integrated geomechanical modeling in Gazprom neft PJSC. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2016, no. 12, pp. 16–19. In Rus.
8. Talreja R., Bahuguna S., Havelia K. Merits of 3D numerical over 1D analytical geomechanics solution for a complex subsurface. *SPE oil and gas conference and Exhibition*. Mumbai, 2019. pp. 1–16.



9. Shen X. Integrated workflow for feasibility study of cuttings reinjection based on 3D geomechanics analysis and case study. *SPE Asia Pacific drilling technology conference*. Virtual, 2021. pp. 1–12.
10. Zienkiewicz O.C. *The finite element method*. London, McGraw-Hill, 1977. 787 p.
11. Settari A., Mourits F.M. A coupled reservoir and geomechanical simulation system. *SPE Journal*, 1998, vol. 3, Iss. 03, pp. 219–226.
12. Settari A., Walters D. A. Advances in coupled geomechanical and reservoir modeling with applications to reservoir compaction. *SPE Reservoir Simulation Symposium: Proceedings*. Houston, 1999. pp. 1–13.
13. Popova V.S., Kharitonov A.Yu. Computer simulation of processes at well drilling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 12, pp. 18–27. In Rus.
14. Charlez Ph. *Rock mechanics: petroleum applications*. Paris, Editions Technip, 1997. Vol. 2, 661 p.
15. Bulatov A.I. *Mekhanika tsementnogo kamnya neftyanykh i gazovykh skvazhyn* [Cement stone mechanics of oil and gas wells]. Krasnodar, North Caucasus Branch of the Engineering Academy of the Russian Federation Publ., 1994. 519 p.
16. Ilyasov A.M. Strength evaluation of a cement sheath adjacent to a production wellbore. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, vol. 58, no. 1, pp. 210–217. In Rus.
17. Popov S.N., Chernyshov S.E., Gladkikh E.A. Influence of sandstone reservoir deformations during bottomhole and reservoir pressure decreasing on the permeability and well productivity changes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 148–157. In Rus.
18. Popov S.N. Geomechanical modeling and the casing stability analysis in conditions of partial absence of cement stone. *SOCAR Proceeding*, 2021, S.I. no. 2, pp. 34–40. In Rus.
19. Chernyshov S.E., Popov S.N., Varushkin S.V., Melekhin A.A., Krivoshchekov S.N., Ren S. Scientific justification of the perforation methods for the Famennian deposits in the southeast of the Perm region. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 257, no. 5, pp. 732–743. In Rus.
20. Chernyshov S.E., Repina V.A., Krysin N.I., Macdonald D.I.M. Improving the efficiency of terrigenous oil-saturated reservoir development by the system of oriented selective slotted channels. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 246, no. 6, pp. 660–666. In Rus.

Received: 24 November 2022.

Reviewed: 9 December 2022.

#### Information about the authors

**Sergey N. Popov**, Dr. Sc., chief researcher, head of the laboratory, Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Science.

**Sergey E. Chernyshov**, Dr. Sc., acting for the head of the Oil and Gas Technologies Department, Perm National Research Polytechnic University.

**Sergey N. Krivoshchekov**, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 51-74

## ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ ГРУНТА МЕТОДОМ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫХ СЕТОК ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ УПЛОТНЕНИЯ ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТОВ ГЛУБИННЫМИ ВЗРЫВАМИ

Тарасенко Елена Олеговна,  
galail@mail.ru

Северо-Кавказский федеральный университет,  
Россия, 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, корп. 2.

**Актуальность.** С целью обеспечения длительной эксплуатации и прочности зданий и сооружений на этапах их проектирования и строительства на просадочных лёссах необходимо проводить численную оценку плотностных характеристик грунтов. Просадочные лёссы широко распространены в мире. Их можно наблюдать в России, Китае, странах Средней Азии и т. д. На территории России их залегание отмечается более чем на 17 % от всей территории страны. Практически повсеместное распространение лёссовых грунтов встречается на территории Северо-Кавказского региона (80–85 % площади). Отмечается большая их мощность (до 50 м). Настоящая работа посвящена численному моделированию оценки плотностных характеристик просадочных грунтов методом конечно-разностных сеток в рамках математической модели уплотнения лёссов глубинными взрывами. Применение аппарата вычислительной математики позволило решить задачу оценки плотности уплотняемого просадочного грунта в зависимости от глубины заложения заряда взрывчатого вещества.

**Цель:** провести численную оценку плотности грунта в рамках математического моделирования уплотнения методом глубинных взрывов просадочных лёссовых грунтов.

**Методы:** применение аппарата вычислительной математики, дифференциальных уравнений в частных производных, методов и результатов физики твёрдого тела, инженерной геологии, механики грунтов.

**Методика эксперимента.** Проведено численное моделирование оценки плотности уплотняемого грунта глубинными взрывами на основе метода сеток.

**Результаты.** На основе метода сеток по явной конечно-разностной схеме построены дискретные линейные динамические системы для численного расчёта плотности уплотняемого просадочного грунта глубинными взрывами. Описано послойное приближение к решению дифференциального уравнения в частных производных с заданными начальным и граничными условиями, математически описывающего технологический процесс уплотнения просадочного грунта для случаев реализации поверхностного выброса и камуфлетного уплотнения. Указано условие устойчивости полученных конечно-разностных схем. Проведён вычислительный эксперимент, который продемонстрировал адекватность предложенного метода оценки плотности уплотняемого грунта экспериментальным данным.

**Выводы.** Построенные численные решения задач в рамках математического моделирования уплотнения просадочных грунтов глубинными взрывами указывают на возможности их практического применения в качестве расчётных методик для снижения затрат на проведение производственных работ по уплотнению лёссов. Предложенные в работе методики определения плотности грунтов могут найти реализацию в ряде направлений прикладных исследований механики грунтов.

### Ключевые слова:

просадочный грунт, плотность грунта, уплотнение глубинными взрывами, математическое моделирование, численное моделирование, конечно-разностная схема, метод сеток.

### Введение

Просадочные грунты широко представлены на территории России (более 17 %), Китая, Средней Азии и т. д. Концентрация (более 80 %) просадочных грунтов России фиксируется на юге страны и других территориях [1–3].

Исключение свойства просадочности грунтов является актуальной инженерно-геологической задачей при возведении зданий и сооружений гражданского строительства. Применяются различные методы и способы уплотнения просадочных грунтов [4–6]. На территории Северного Кавказа широкое распространение получил метод глубинных взрывов [7]. Математическое описание технологического процесса уплотнения грунтов этим методом представлено в работах [8–10]. Аналитические выражения для расчёта плотности грунта после взрыва строятся на основе решения дифференциального уравнения в частных производных с заданными начальным и граничными условиями. Предложенные авторами в [8] решения позволяют находить плотность грунта после его

уплотнения вблизи расположения сосредоточенного заряда. Приводятся решения отдельных обратных прикладных задач [9, 10]. Однако решения таких задач по всей области распространения взрывной волны являются актуальными. Динамические свойства грунтов изучаются в работах [11–13]. Авторами рассматриваются вопросы формирования дренажных систем в результате глубинных взрывов. В [14–16] приведён анализ зависимостей отдельных характеристик грунта от пористости в различных исследуемых системах.

В данной работе построим решение начально-краевой задачи, описывающей технологический процесс уплотнения грунтов глубинными взрывами, средствами вычислительной математики, методом конечно-разностных сеток, для оценки плотности уплотняемого грунта.

### Математическая постановка задачи уплотнения просадочных грунтов

Опишем математическую постановку задачи уплотнения просадочных грунтов методом глубинных взрывов в виде [8]:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + U \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial q}{\partial z} + f, \quad t \in [t_0, T], \quad (1)$$

$$q(t_0, x, y, z) = Q \cdot \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0), \quad (2)$$

$$q(t, x, y, z)|_{z=z_0} = 0, \quad t > t_0, \quad (3)$$

$$K_{zz} \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = 0, \quad t > t_0, \quad (4)$$

$$f(t, x, y, z) = QR(t, x, y, z) = Q\delta(t - t_0) \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - H).$$

Здесь  $q(t, x, y, z)$  – плотность скелета уплотнённого грунта в единицу времени  $t$  в точке с координатами  $(x, y, z)$ ;  $q(t_0, x, y, z)$  – плотность скелета грунта до его уплотнения;  $U$  – вектор горизонтального сноса газа вдоль оси  $Ox$ ;  $x, y, z$  – пространственные координаты;  $f$  – функция источника газа;  $Q$  – мощность взрывчатого вещества (источника);  $\delta$  – единичная импульсная функция Дирака;  $K_{ij}$  – диффузионные коэффициенты.

Задача (1)–(3) описывает реализацию полного поглощения атомов газа окружающим его грунтом в скважине (происходит уплотнение просадочного грунта). Задача (1), (2), (4) представляет полное отражение атомов газа от окружающего его грунта (реализуется выброс грунта на поверхность).

#### Численное моделирование плотности уплотняемого грунта

Воспользуемся аппаратом вычислительной математики. Применение отдельных алгоритмов метода сеток и их модификаций в решении практических задач осуществляется в [17–19]. Решение начально-граничных задач проведём методом конечно-разностных сеток по явной схеме.

Реализуем переход от непрерывной к дискретной модели. В пространстве состояний построим линейную динамическую систему. Предположим, что рассматриваемая геологическая система изотропна. Зададим конечно-разностную схему

$$(z_m, t_k), m = 0, 1, \dots, M, \quad k = 0, 1, \dots, K,$$

где

$$z_m = a + m\Delta z; \quad t_k = k\Delta t; \quad \Delta z = \frac{b-a}{M-1}; \quad \Delta t = \frac{T}{K-1}.$$

К решению задачи будем приближаться по слоям. Каждый слой задаётся совокупностью всех сеточных узлов с одной и той же временной координатой. Таким образом,  $k$ -й слой системы пространственных состояний содержит множество узлов

$$(z_0, t_k), (z_1, t_k), (z_2, t_k), \dots, (z_M, t_k), \quad k = 0, 1, \dots, K.$$

Введём обозначения

$$q_m^k = q(z_m, t_k);$$

$$q_m^0(z_m, 0) = Q \cdot \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - z_0); \quad (2')$$

$$q^k = q(x, y, z, t_k), \quad (3')$$

$$K_{zz}^k = K_{zz} \frac{\partial q(x, y, z, t_k)}{\partial z}. \quad (4')$$

Осуществим переход от частных производных к их конечно-разностным аппроксимациям по явной двухслойной схеме. Заменим производные в (1) разностными отношениями:

$$\frac{\partial q}{\partial t} \Big|_{(z_m, t_k)} \approx \frac{q_m^{k+1} - q_m^k}{\Delta t}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{(z_m, t_k)} \approx \frac{q_{m+1}^k - q_m^k}{\Delta z}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \Big|_{(z_m, t_k)} \approx \frac{q_{m+1}^k - 2q_m^k + q_{m-1}^k}{\Delta z^2}. \quad (7)$$

Учитывая граничные условия (3), получим дискретную линейную динамическую систему вида

$$\begin{bmatrix} q_1^k \\ q_2^k \\ q_3^k \\ \vdots \\ q_{m-2}^k \\ q_{m-1}^k \\ q_m^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_2 & \alpha_3 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_2 & \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \alpha_1 & \alpha_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} q_1^{k-1} \\ q_2^{k-1} \\ q_3^{k-1} \\ \vdots \\ q_{m-2}^{k-1} \\ q_{m-1}^{k-1} \\ q_m^{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \alpha_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_{zz}^{k-1} \\ q^{k-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

или в более компактной форме

$$q^k = A_1^{k-1} \cdot q^{k-1} + B_1^{k-1} \cdot C_1^{k-1}, \quad k = 1, 2, \dots, K.$$

В случае граничного условия (4) получим систему вида

$$\begin{bmatrix} q_1^k \\ q_2^k \\ q_3^k \\ \vdots \\ q_{m-2}^k \\ q_{m-1}^k \\ q_m^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_2 & \alpha_3 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_2 & \alpha_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \alpha_4 \alpha_1 & \alpha_4 \alpha_2 & \alpha_4 \alpha_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} q_1^{k-1} \\ q_2^{k-1} \\ q_3^{k-1} \\ \vdots \\ q_{m-2}^{k-1} \\ q_{m-1}^{k-1} \\ q_m^{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \alpha_5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_{zz}^{k-1} \\ q^k \end{bmatrix} \quad (9)$$

или в более компактной форме

$$q^k = A_2^{k-1} \cdot q^{k-1} + B_2^{k-1} \cdot C_2^{k-1}, \quad k = 1, 2, \dots, K.$$

Системы уравнений (8) и (9) являются дискретными линейными динамическими системами, в которых число уравнений совпадает с числом неизвестных. Поиск решения подобных систем реализуется по слоям. Координаты двумерного вектора входных воздействий  $U, Q$  образуют граничные условия. Начальное условие (2') определяет решение системы на нулевом слое. Находим решение  $q_m^k, m=0, 1, \dots, M$  на  $k$ -м слое. Зная его, можно найти решение  $q_m^{k+1}$  на следующем  $(k+1)$ -м слое по явной разностной схеме, с применением формул (5)–(7).

Коэффициенты основных матриц систем (8) и (9) определяются из соотношений

$$\alpha_1 = \gamma_1 + \gamma_2; \quad \alpha_2 = 1 - 2\gamma_2; \quad \alpha_3 = \gamma_2 - \gamma_1; \\ \alpha_4 = \frac{1}{1 + \Delta z}; \quad \alpha_5 = \frac{\Delta z}{1 + \Delta z}; \quad \gamma_1 = \frac{U \Delta t}{2 \Delta z}; \quad \gamma_2 = \frac{K_{zz} \Delta t}{\Delta z^2}.$$

Основные матрицы алгебраических систем (8) и (9) являются постоянными

$$A_{1,2}^k = A \in R^{m \times m}, \quad B_{1,2}^k = B \in R^{m \times 2}.$$

В системе (8)  $m=M-1$  – вектор плотности скелета уплотняемого грунта  $q^k$  – состоит из всех внутренних узлов конечно-разностной сетки. В системе (9)  $m=M$  – вектор плотности скелета уплотняемого грунта  $q^k$  – состоит из всех внутренних узлов конечно-разностной сетки, а также правой её границы.

Устойчивость явной разностной схемы, задаваемой системами алгебраических уравнений (8) и (9), с учётом начального и граничных условий (2')–(4'), определяется в следующей теореме.

**Теорема [9].** Пусть  $\Delta t = \frac{\Delta z^2}{2}$ . Тогда разностные схемы (8) и (9) устойчивы в сеточной норме пространства

$$C: \|q\| = \|q\|_C = \max_{\substack{z \in [z_0, z_m] \\ t \in [t_0, t_k]}} |q(z, t)|.$$

Погрешность аппроксимации явной разностной схемы имеет второй порядок по  $z$  и первый порядок по  $t$ :  $O(z^2 + t)$ .

#### Вычислительный эксперимент

Для представленных выше конечно-разностных схем (8) и (9), являющихся решением дифференциального уравнения (1) с заданными начальными и граничными условиями (2')–(4'), описывающих математическую модель уплотнения просадочных грунтов методом глубинных взрывов сосредоточенного заряда, построим численную реализацию на натурном строительном объекте. Отдельные экспериментальные данные представлены в [7, 20].

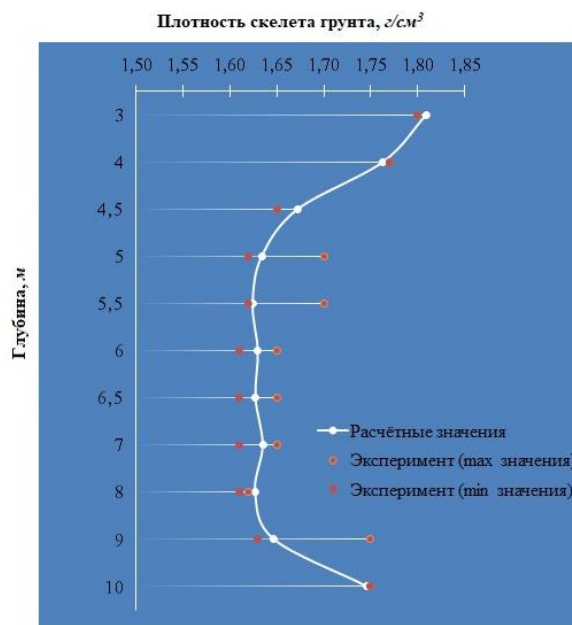
**Пример.** В [7] изложены материалы проведения гидровзрывного уплотнения на объекте «Общежитие на 203 места Прикумского завода пластмасс в 7-м микрорайоне». Мощность просадочной толщи составляет

20 м. Средняя плотность сухого грунта на площадке до его уплотнения составила  $q(t_0, x, y, z) = 1,42$  г/см<sup>3</sup>. Геологическая система является анизотропной согласно геологическому строению толщ на площадке. Заряды взрывчатого вещества массой по 5 кг закладывались в скважины диаметром 200 мм на глубину  $H=6$  м по сетке  $4 \times 5$  м. В течение 10 дней напуском воды (7400 м<sup>3</sup>) в котлован осуществлялось замачивание грунтов. Сразу после взрывов грунт находится в мягкопластичном и текучем состоянии и монолиты было невозможно отобрать. Отбор монолитов был реализован через 4 месяца после сброса воды. Пробурили три скважины с отбором монолитов до глубины 10 м. Выполняется граничное условие (3) – полное поглощение атомов газа, образующегося в результате взрыва заряда, окружающим его грунтом.

Для численного расчёта плотности грунта в результате его уплотнения методом глубинного взрыва воспользуемся линейной динамической алгебраической системой уравнений (8), построенной на основе конечно-разностной явной сетки. В таблице представлены расчётные значения по предложенной вычислительной схеме и показатели плотности, взятые из экспериментальных данных [7].

Наблюдается отклонение полученных расчётных значений плотности скелета грунта от экспериментальных. Абсолютная погрешность вычислений изменяется в интервале от 0,01 до 0,1. Допустимая вычислительная погрешность метода сеток равна  $\approx 0,01$ .

Геометрическая интерпретация полученных численных результатов вычислительного эксперимента приведена на рисунке. Построена зависимость плотности скелета грунта от изменений координат по оси  $Oz$ .



**Рисунок.** Графическое представление решения начально-граничной задачи (1)–(3) по явной конечно-разностной схеме

**Figure.** Graphical representation of the solution of the initial-boundary problem (1)–(3) according to the explicit finite-difference scheme

**Таблица.** Расчётные и экспериментальные значения плотности скелета грунта

**Table.** Calculated and experimental values of the dry soil density

Глубина, м Depth, m	Расчётная плотность скелета грунта, г/см <sup>3</sup> Dry soil estimated density, g/cm <sup>3</sup>	Экспериментальная плотность скелета грунта [7], г/см <sup>3</sup> Dry soil experimental density [7], g/cm <sup>3</sup>
3,0	1,81	1,80
4,0	1,76	1,77
4,5	1,67	1,65
5,0	1,63	1,62...1,70
5,5	1,62	—
6,0	1,63	1,61...1,65
6,5	1,63	—
7,0	1,64	1,61...1,65
8,0	1,63	1,61...1,62
9,0	1,65	1,63...1,75
10,0	1,74	1,75

Согласно данным эксперимента заряд взрывчатого вещества расположен в точке с координатами (0, 0, 6). Полученные вычислительные результаты показывают, что в зоне нахождения заряда плотность скелета уплотнённого грунта принимает значения  $q \approx 1,61\text{--}1,65$  г/см<sup>3</sup>. В зоне распространения газа взрывчатого вещества от

центра взрыва наблюдается более существенное проникновение атомов газа в грунт и увеличение плотности скелета грунта. Под воздействием высоких давлений происходит разрушение скелета грунта, а газ сгорает. Тем самым реализуется уплотнение грунтовых толщ. После проведения глубинных взрывов верхние слои строительной площадки доуплотняются поверхностными методами уплотнения грунтов, согласно [7].

#### Заключение

Полученные конечно-разностные явные схемы (8) и (9) позволяют численно моделировать решение дифференциального уравнения с заданными начальными и граничными условиями, описывающего инженерно-геологическую систему уплотнения просадочных грунтов методом глубинных взрывов. Проведённый вычислительный эксперимент по разработанной линейной динамической схеме (8) продемонстрировал адекватность предложенной математической модели экспериментальным данным. Полученные теоретические результаты (конечно-разностные схемы) могут быть использованы на практике при проектировании зданий и сооружений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лёссовые породы СССР. Т. 1. Инженерно-геологические особенности и проблемы рационального использования / под ред. Е.М. Сергеева, А.К. Ларионова, Н.Н. Комиссаровой. – М.: Изд-во «Наука», 1986. – 273 с.
2. Лёссовые породы СССР. Т. 2. Региональные особенности / под ред. Е.М. Сергеева, В.С. Быковой, Н.Н. Комиссаровой. – М.: Изд-во «Наука», 1986. – 276 с.
3. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – М.: Изд-во стандартов, 2020. – 41 с.
4. Пантюшина Е.В. Лёссовые грунты и инженерные методы устранения их просадочных свойств // Ползуновский вестник. – 2011. – № 1. – С. 127–130.
5. Ivanov P.L. Compaction of cohesion less soils by explosives // Proceedings of the VI International conference on soil mechanics and foundation engineering. – Montreal, 1966. – V. 3. – P. 352–354.
6. Liman A.K. Compaction of cohesion less foundation soils by explosives // Civil Engineering. – 1940. – V. 10. – Iss. 4. – P. 9–15.
7. Галай Б.Ф. Уплотнение просадочных грунтов глубинными взрывами. – Ставрополь: Изд-во «Сервисшкола»; СКФУ, 2015. – 240 с.
8. Тарасенко Е.О., Тарасенко В.С., Гладков А.В. Математическое моделирование уплотнения просадочных лёссовых грунтов Северного Кавказа глубинными взрывами // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 94–101.
9. Тарасенко Е.О., Гладков А.В. Численное решение обратных задач при математическом моделировании геологических систем // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 105–112.
10. Tarasenko E.O., Gladkov A.V., Gladkova N.A. Solution for inverse boundary value problems on the power of a concentrated charge in a mathematical model of subsidence soils compaction // Mathematics and its applications in new computer systems. MANCS 2021. Lecture notes in networks and systems. – Cham: Springer, 2022. – V. 424. – P. 537–545.
11. Consolidation of organic subsoil's by applying underground explosions for formations of vertical sands drains and generating dynamic overloading / E. Dembicki, N. Kisielowa, R. Bona, R. Imiolek, A. Michowski, I. Semrau // Proceedings 9 International Harbor Congress. – Antwerp, 1988. – P. 5.165–5.170.
12. Dynamic consolidation of organic subsoil's by use of hidden underground explosions / E. Dembicki, N. Kisielowa, R. Bona, R. Imiolek, A. Michowski, I. Semrau // Proc. of the II Baltic conference S. M. F. E. – Tallinn, 1988. – P. 273–277.
13. Dynamic response of a geotechnical rigid model container with absorbing boundaries / D. Lombardi, S. Bhattacharya, F. Scarpa, M. Bianchi // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2015. – V. 69. – P. 46–56.
14. Свидерских А.В., Носков И.В. Анализ изменения характеристик лёссовых грунтов в зависимости от пористости // Вестник Евразийской науки. – 2019. – Т. 11. – № 2. URL: <https://esj.today/PDF/76SAVN219.pdf> (дата обращения 25.12.2022).
15. Tsukamoto Y., Ishihara K. Analysis on settlement of soil deposits following liquefaction during earthquakes // Soils and Foundation. – 2010. – № 50 (3). – P. 399–441.
16. Ishihara K. New challenges in Geotechnique for ground hazards due to intensely strong earthquake shaking // Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. – 2009. – № 11. – P. 91–114.
17. Кувшинова А.Н., Цыганов А.В., Цыганова Ю.В. Математическое моделирование процесса параметрической идентификации моделей конвективно-диффузионного переноса с применением SVD-фильтра Калмана // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. – 2021. – Т. 25. – № 4. – С. 716–737.
18. Решение трехмерного нестационарного уравнения теплопроводности методом конечных элементов с учетом фазовых переходов / М.П. Галанин Н.Н. Прошунин, А.С. Родин, Д.Л. Сорокин // Препринты Института прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук. – 2016. – № 66. – 27 с.
19. Решение трехмерных уравнений теплопроводности с помощью разрывного метода Галеркина на неструктурированных сетках / Р.В. Жалнин, М.Е. Ладонкина, В.Ф. Масягин, В.Ф. Тишкин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия Физико-математические науки. – 2015. – Т. 19. – № 3. – С. 523–533.
20. Experimental and theoretical study on the seepage mechanism characteristics coupling with confining pressure / J. Wang, H. Ma, J. Qian, P. Feng, X. Tan, L. Ma // Engineering Geology. – 2021. – V. 291. – P. 73–84.

Поступила: 11.01.2023 г.

Дата рецензирования: 15.01.2023 г.

#### Информация об авторах

**Тарасенко Е.О.**, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры вычислительной математики и кибернетики Факультета математики и компьютерных наук имени профессора Н.И. Червякова Северо-Кавказского федерального университета.

UDC 51-74

## NUMERICAL ESTIMATION OF SOIL DENSITY BY THE METHOD OF FINITE DIFFERENCE GRIDS IN MATHEMATICAL MODELING OF COMPACTION OF SUBSIBLE SOILS BY DEEP EXPLOSIONS

Elena O. Tarasenko,  
galail@mail.ru

North-Caucasian Federal university,  
1, bld. 2, Pushkin street, Stavropol, 355009, Russia.

**Relevance.** In order to ensure the duration of operation and strength of buildings and their expected design and construction on subsiding loess, it is necessary to carry out a numerical grade of the density characteristics of soils. Subsiding loesses are widespread in the world. They can be observed in Russia, China, the countries of Central Asia, etc. On the territory of Russia, their occurrence is noted at least at 17 % of the entire territory of the country. Almost ubiquitous distribution of loess soils occurs on the territory of the North Caucasus region (80–85 % of area). There is a large capacity of them (up to 50 m). This work is devoted to numerical modeling of the grade of density characteristics of subsiding soils using the finite difference grid method in the framework of a mathematical model of loess compaction by deep explosions. The use of the instrument of computational mathematics made it possible to solve the problem of estimating the compacted subsidence soil density depending on the depth of the explosive charge.

**The main aim** of the research is to conduct a numerical assessment of soil density within the framework of mathematical modeling of compaction by the method of deep explosions of subsiding loess soils.

**Methods:** application of the instrument of computational mathematics, differential equations, methods and results of solid state physics, engineering geology, soil mechanics.

**Experimental technique.** Numerical modeling of the assessment of the increase in the compacted soil by deep explosions based on the grid method was carried out.

**Results.** Based on the grid method using an explicit finite-difference scheme, discrete linear dynamic systems were constructed for numerical calculation of compacted subsidence soil density by deep explosions. The paper describes the layer-by-layer approximation to the solution of a differential equation in partial derivatives with given initial and boundary conditions, which mathematically describes the technological process of compaction of subsiding soil for the cases of surface ejection and camouflage compaction. The stability condition for the obtained finite-difference schemes is indicated. A computational experiment was carried out. It demonstrated the adequacy of the proposed method for estimating the compacted soil density to experimental data.

**Findings.** The constructed numerical solutions of problems within the framework of mathematical modeling of the compaction of subsiding soils by deep explosions indicate the possibility of their practical application as calculation methods to reduce the cost of carrying out production work on the compaction of loess. The methods proposed in the work for determining soil density can be implemented in a number of areas of applied research in soil mechanics.

### Key words:

subsiding soil, soil density, compaction by deep explosions, mathematical modeling, numerical modeling, finite difference scheme, grid method.

### REFERENCES

1. *Lossovye porody SSSR. T. 1. Inzhenerno-geologicheskie osobennosti i problemy estestvennogo ispolzovaniya* [Loess rocks of the USSR. Vol. 1. Engineering-geological features and problems of natural use]. Eds. E.M. Sergeev, A.K. Larionov, N.N. Komissarova. Moscow, Nauka Publ., 1986. 273 p.
2. *Lossovye porody SSSR. T. 2. Regionalnye osobennosti* [Loess rocks of the USSR. Vol. 2. Regional features]. Eds. E.M. Sergeev, V.S. Bykova, N.N. Komissarova. Moscow, Nauka Publ., 1986. 276 p.
3. GOST 25100-2020. *Grunty. Klassifikatsiya* [State Standard 25100-2020. Soils. Classification]. Moscow, Standards Publ., 2020. 41 p.
4. Pantyushina E.V. Loess soils and engineering methods for eliminating their subsidence properties. *Polzunovskiy vestnik*, 2011, no. 1, pp. 127–130. In Rus.
5. Ivanov P.L. Compaction of cohesion less soils by explosives. *Proceedings of the VI International conference on soil mechanics and foundation engineering*. Montreal, 1966, vol. 3. pp. 352–354.
6. Liman A.K. Compaction of cohesion less foundation soils by explosives. *Civil Engineering*, 1940, vol. 10, Iss. 4, pp. 9–15.
7. Galay B. F. *Uplotnenie prosadochnykh gruntov glubinnymi vzryvami* [Compaction of subsiding soils by deep explosions]. Stavropol, Serveshkola, NCFU Publ., 2015. 240 p.
8. Tarasenko E. O., Tarasenko V. S., Gladkov A.V. Mathematical modeling of compaction of subsident loess soils of the North Caucasus by deep explosions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 94–101. In Rus.
9. Tarasenko E. O., Tarasenko V. S., Gladkov A.V. Numerical solution of inverse problems in mathematical modeling of geological systems. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 105–112. In Rus.
10. Tarasenko E.O., Gladkov A.V., Gladkova N.A. Solution for inverse boundary value problems on the power of a concentrated charge in a mathematical model of subsidence soils compaction. *Mathematics and its applications in new computer systems. MANCS 2021. Lecture notes in networks and systems*. Cham, Springer, 2022. Vol. 424, pp. 537–545.
11. Dembicki E., Kisielowa N., Bona R., Imiolek R., Michowski A., Semrau I. Consolidation of organic subsoil's by applying underground explosions for formations of vertical sands drains and generating dynamic overloading. *Proceedings. 9 International Harbor Congress*. Antwerp, 1988. pp. 5.165–5.170.
12. Dembicki E., Kisielowa N., Bona R., Imiolek R., Michowski A., Semrau I. Dynamic consolidation of organic subsoil's by use of hidden underground explosions. *Proceedings of the II Baltic conference S. M. F. E.* Tallinn, 1988. pp. 273–277.
13. Lombardi D., Bhattacharya S., Scarpa F., Bianchi M. Dynamic response of a geotechnical rigid model container with absorbing boundaries. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, vol. 69, pp. 46–56.
14. Sviderskikh A.V., Noskov I.V. Analysis of characteristics changes in the loess soils depending on porosity. *The Eurasian Scientific*



- Journal*, 2019, no. 2, vol. 11. In Rus. Available at: <https://esj.today/PDF/76SAVN219.pdf> (accessed 25 December 2022).
15. Tsukamoto Y., Ishihara K. Analysis on settlement of soil deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundation*, 2010, no. 50 (3), pp. 399–441.
  16. Ishihara K. New challenges in Geotechnique for ground hazards due to intensely strong earthquake shaking. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*, 2009, no. 11, pp. 91–114.
  17. Kuvshinova A.N., Tsyganov A.V., Tsyganova Yu.V. Mathematical modeling of parameter identification process of convection-diffusion transport models using the SVD-based Kalman filter. *Journal of the Samara State Technical University. Series Physical and Mathematical Sciences*, 2021, vol. 25, no. 4, pp. 716–737. In Rus.
  18. Galanin M.P., Proshunin N.N., Rodin A.S., Sorokin D.L. Reshenie trekhmernogo nestatsionarnogo uravneniya teploprovodnosti metodom konechnykh elementov s uchetom fazovykh perekhodov [Solving the three-dimensional non-stationary heat equation by the finite element method with allowance for phase transitions]. *Preprints of the Institute of Applied Mathematics. M.V. Keldysh of the Russian Academy of Sciences*, 2016, no. 66, 27 p.
  19. Zhalnin R.V., Ladonkina M.E., Masyagin V.F., Tishkin V.F. Solution of 3D heat conduction equations using the discontinuous Galerkin method on unstructured grids. *Journal of the Samara State Technical University. Series Physical and Mathematical Sciences*, 2015, vol. 19, no. 43, pp. 523–533. In Rus.
  20. Wang J., Ma H., Qian J., Feng P., Tan X., Ma L. Experimental and theoretical study on the seepage mechanism characteristics coupling with confining pressure. *Engineering Geology*, 2021, vol. 291, pp. 73–84.

*Received: 11 January 2023.*

*Reviewed: 15 January 2023.*

#### Information about the authors

**Elena O. Tarasenko**, Cand. Sc., assistant professor, North-Caucasian Federal University.

UDC 62-62

## CALCULATION OF HEAT TRANSFER INTENSITY OF GAS FUEL COMBUSTION PRODUCTS

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

Olga V. Afanaseva<sup>2</sup>,  
eccolga@mail.ru

Oleg Yu. Kuleshov<sup>1</sup>,  
o-yu-kul@yandex.ru

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

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
29, Politekhnikeskaya street, Saint Petersburg, 195251, Russia.

**The relevance** of the research is determined by the modern trend in the field of thermal power engineering and heat engineering for the transition from traditional gaseous fuel (methane) to the use of hydrogen, methane-hydrogen mixtures, as well as thermochemical conversion gases. Switching to new non-design fuel is justified by considerations of reducing the negative impact on the environment and increasing the thermal efficiency of fuel combustion plants. In this case, the use of fuels with a composition different from the design one will affect the heat transfer processes.

**The main aim:** carrying out a comparative analysis of indicators of the intensity of radiant and convective heat transfer of combustion products of non-design fuels, such as hydrogen, methane-hydrogen mixture and thermochemical conversion gases. As an assumption in the formulation of the problem and objectives of the study, the constancy of the heat release power in the apparatus due to changes in the amount of fuel burned was taken.

**Objects:** heat exchange surface of a fire-tube hot water boiler.

**Methods:** carrying out numerical calculation using traditional approaches to determine the indicators of the intensity of heat transfer in the system «combustion products – metal wall of the pipe of thermal power plants». We also used the relations tested earlier by other authors to calculate the thermophysical parameters of gas mixtures.

**Results.** According to the results of the performed comparative calculations, we can conclude that the transition from the use of conventional fuel (natural gas/methane) to its thermochemical conversion gases under the considered conditions has almost no effect on the integral heat transfer performance. To a greater extent, this transition is caused by changes in the intensity of heat transfer for products of combustion of hydrogen and methane-hydrogen mixture, which will affect the operation of thermal power and heat technological installations. At the same time, it is necessary to conduct additional research on the combustion kinetics of thermochemical methane conversion gases, their thermophysical properties, etc., because the hardware design, type of the catalyst used and operating parameters of the process will affect the composition of obtained synthesis gas.

### Key words:

conversion, hydrogen, methane, thermochemical regeneration, hot water boiler, catalyzator, synthesis gas, combustion products, temperature.

### Introduction

In today's realities in the field of heat power and heat engineering the question of environmental safety or even carbon neutrality of production processes, as well as increasing their fuel efficiency in terms of reducing the cost of primary fuel for the output of finished products or services is acute.

One of the directions to improve the environmental efficiency of fuel-using units is their conversion to hydrogen combustion. This development vector of industrial thermal power engineering and thermal power plants is reflected in modern research [1]. However, the work with pure hydrogen imposes certain features on the systems of safe storage, supply and end-use of hydrogen. At the same time, the transition to the use of pure hydrogen as fuel will require a significant modernization of the entire gas transportation infrastructure in Russia. In papers of domestic authors it is noted that with hydrogen content up to 40 % in the mixture with natural gas the existing systems of pipeline transport of such gas practically do not require modernization [2].

Recently there have been a number of papers devoted not so much to the regenerative use of thermal secondary energy sources for heating air, and in some cases fuel [3], as to thermochemical regeneration. Its essence is to use the heat of waste flue gases for preliminary endothermic processing of the original fuel [4–8]. As a result of such conversion fuel gets a larger amount of chemically bound energy in the form of increased calorific value. Ethanol, methanol [9, 10] can be used as a feedstock for steam reforming, along with methane [11], and in some cases even the possibility of pre-gasification of solid fuel by steam [12], obtained from the heat of flue gases, and a steam-gas mixture, representing inherently combustion products, i. e. using direct contact between the gasifying agent and the feed fuel is considered. A similar approach is considered in [13], where thermochemical heat recovery on the basis of methane steam conversion with addition of flue gases, and in [14] the possibility of methane reforming by products of complete combustion with application of nickel catalysts is evaluated on the basis of experimental studies.

There have appeared works not only of a theoretical nature on the study of the processes of thermochemical heat recovery of waste combustion products [15, 16], but also of an experimental plan [17–19]. Such works have been carried out for internal combustion engines [20–22], gas turbines [15, 23], industrial furnaces for various purposes [16, 17, 24], and other fuel-using thermal power and heat engineering installations. A variety of application areas for the technology of thermochemical heat recovery of combustion products shows the promise of this method of improving the energy efficiency of existing and developed equipment.

The transition from combustion of the project fuel – natural gas (methane), should affect the thermal regime of heat power and thermo-technical equipment. Heat transfer coefficients, temperatures of gases and heat exchange surfaces, their heat absorption, combustion processes, aerodynamics of the gas-air duct and, of course, thermal efficiency of the unit as a whole should be expected to change.

### Methods

Based on the notion of high-temperature thermal secondary energy sources formation in the form of flue gases and the highest priority of their use as a source of thermal energy for the reactions of thermochemical conversion of the original fuel and its subsequent combustion, we can note the importance and need for a comparative analysis of indicators of intensity of heat exchange of their combustion products. Thus, it is necessary to select the fuels that we will consider in the framework of this work. First of all, these will be methane and methane-hydrogen mixture (MHM), as well as pure hydrogen and thermochemical conversion gases, for which works on numerical and experimental determination of combustion kinetics were performed [25].

The main thermotechnical characteristic of combustion products of combustible gases that allow us to perform a comparative analysis is the intensity of heat transfer, defined by the corresponding coefficients of radiant and convective heat transfer.

By analogy with the works of professor Yu.Ya. Pechenegov [26], as well as taking into account the ratios presented in [27] for the case of intra-channel movement of heat carriers with a slight change in physical properties across the channel, the following parameters,  $W/(m^2 \cdot K)$  are taken as indicators of heat transfer intensity:

$$P_l = \frac{5.67 \cdot \varepsilon_g \cdot ((T/100)^4 - 55.5)}{T - 273}$$

and

$$P_c = \frac{\lambda}{d} \cdot 0.023 \cdot \left( \frac{w \cdot d}{\nu} \right)^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot \varepsilon_L, \quad (1)$$

where  $\varepsilon_g$  is the degree of blackness of the combustion products;  $T$  is the design temperature, K;  $\lambda$  is the heat conductivity coefficient of the combustion products,  $W/(m \cdot K)$ ;  $d$  is the determining size (for the case of movement of combustion products inside the pipes, it is taken equal to the inner diameter), m;  $w$  is the speed of the combustion products, m/s;  $\nu$  is the kinematic viscosity

coefficient of the combustion products,  $m^2/s$ ;  $Pr$  is the criterion of thermophysical properties of a mixture of gases (Prandtl criterion);  $\varepsilon_L$  is the correction taking into account the ratio of the length of the pipe  $L$  to its inner diameter  $d$ .

Similarly to the approach described in [26], the calculated temperature  $T$  can be defined as half of the adiabatic combustion temperature of the fuel.

The expression for  $P_l$  is an expression for calculating the heat transfer coefficient by radiation obtained from the Stefan–Boltzmann equation;  $P_c$  is obtained on the basis of the well-known criterion relationship between the Nusselt and Reynolds numbers under the assumption of a turbulent gas flow regime, which makes it possible to correctly compare heat transfer from combustion products of different composition to the heat exchange surface.

During calculations according to the additivity rule, the molecular mass, density and volumetric heat capacity of the products of combustion (mixture of gases) are determined. The additivity rule cannot be fully extended to multicomponent mixtures. For a binary mixture, the error in determining the thermophysical properties by the additivity rule can reach 20–40 %, which is not in the methods offered in [28]. The dynamic viscosity coefficient of a gas mixture consisting of  $n$  components at low pressure (up to 1 MPa) is determined according to the Chapman–Enskog kinetic theory by the Sutherland–Thiesen formula [28, 29], Pa·s:

$$\mu_{mix} = \sum_{v=1}^V \frac{r_v \cdot \mu_v}{\sum_{w=1}^W r_w \cdot \Phi_{vw}}, \quad (2)$$

where  $r_v$  and  $r_w$  are the molar fractions of the  $v$ -th and  $w$ -th components;  $\mu_v$  is the dynamic viscosity of the pure  $v$ -th component, Pa·s;

$$\Phi_{vw} = \frac{[1 + (\mu_v / \mu_w)^{0.5} \cdot (M_w / M_v)^{0.25}]^2}{[8 \cdot (1 + (M_v / M_w))]^{0.5}}$$

is the Wilke multiplier-function of the ratio of viscosities  $\mu$  and molecular masses  $M$  of the  $v$ -th component by all other  $w$ -th components in the mixture.

The thermal conductivity coefficient of the gas mixture can be determined by Vasilyeva formula [28, 29],  $W/(m \cdot K)$ :

$$\lambda_{mix} = \sum_{v=1}^V \frac{r_v \cdot \lambda_v}{\sum_{w=1}^W r_w \cdot A_{vw}}, \quad (3)$$

where  $\lambda_v$  is the thermal conductivity coefficient of the pure  $v$ -th component,  $W/(m \cdot K)$ ;

$$A_{vw} = \frac{[1 + (\lambda_v / \lambda_w)^{0.5} \cdot (M_v / M_w)^{0.25}]^2}{[8 \cdot (1 + (M_v / M_w))]^{0.5}}$$

is the Mason–Sachsen multiplier-function of the ratio of thermal conductivity and molecular masses of the  $v$ -th component by all other  $w$ -th components in the mixture.

Numerical values of properties of individual components in formulas (2), (3) are taken at the temperature for which the corresponding property is determined.

When calculating the indicator of the intensity of convective heat transfer of combustion products  $P_c$  according to expression (1), the correction value  $\varepsilon_L$  can be taken equal to unity for pipe lengths greater than 50 pipe inner diameters. This condition is satisfied for most gas-tube hot water boilers, including the one considered later in our work. The Prandtl number, taking into account the recommendations of [28], in the framework of this work is determined by the expression:

$$\text{Pr} = \frac{c_{p,m}}{1.204 \cdot c_{p,m} + 6.155},$$

where  $c_{p,m}$  is the heat capacity of combustion products per 1 kmol, kJ/(kmol·K).

In general, the degree of emissivity of combustion products depends on many factors: chemical composition and combustion conditions of the fuel, design of the burner, and other individual features, and most of them are rather problematic to take into account theoretically. It is known that only triatomic gases and gases of high atomicity have appreciable radiation. Therefore, the degree of blackness of combustion products, provided that there are no dust particles and black carbon in their composition, can be determined by the expression [30]

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}},$$

where  $\varepsilon_{\text{CO}_2}$ ,  $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$  is the degree of blackness of carbon dioxide and water vapor in the composition of the combustion products, determined according to the recommendations [30] depending on the temperature of the combustion products;  $\beta$  is the correction factor for partial pressure of water vapor.

When determining the average beam length in this work, we used the dependence obtained for the radiation of an equivalent gas hemisphere [30]

$$l = 0.9 \cdot d.$$

The using parameters  $P_l$  and  $P_c$  in the comparative analysis of combustion products of nonproject fuels makes it possible to identify those of them that provide the greatest intensity of heat exchange of combustion products, and allows establishing the possibility of their use in standard power and heat engineering installations without making significant changes in the design.

## Results and discussion

When determining the conditional velocity of the combustion products  $w$  for calculation  $P_c$ , it is necessary to select the geometric and linear dimensions of the heat exchange surface.

Based on the hypothesis of continuity (continuity), taking into account their temperature, the velocity of combustion products is calculated by the expression, m/s:

$$w = \frac{\nu \cdot B}{f} \cdot \frac{T}{273},$$

where  $\nu$  the volume of combustion products determined according to the method [30] based on the composition of the initial fuel,  $\text{m}^3/\text{m}^3$ ;  $B$  is the fuel consumption,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $f$  is the cross-sectional area provided for the passage of combustion products,  $\text{m}^2$ .

It is suggested to consider a flame and smoke tube boiler of KSV-2.0, as a heat engineering installation in which any of the considered fuels will be used. The nominal heat output of the boiler is 2.0 MW, the boiler's inlet/outlet water temperature is 70/115 °C, the maximum operating water pressure is 0.6 MPa, boiler volume is 5.31  $\text{m}^3$ .

In this paper the movement of combustion products is considered on the example of chimney pipes with an internal diameter of 52 mm and the number of pipes of 36 pcs. In addition to the chosen geometry of the tube bundle, which ensures the passage of combustion products, the total thermal power of the boiler at the level of 2.0 MW, provided by gaseous fuels of different calorific value, is chosen as a constant value, which undoubtedly causes a change in the volumetric flow rates of fuel and the resulting combustion products. In addition, in the calculations it was accepted:  $\eta=92.5\%$  is the boiler efficiency;  $q_3=0.5\%$  is the heat loss with chemical unburning;  $q_4=0\%$  is the heat loss with mechanical unburning;  $q_5=0.5\%$  is the heat loss to the environment.

The composition of thermochemical conversion gases (TCG) is taken on the basis of experimental data presented in [31] for reaction temperature 1200 K and composition  $\text{CH}_4:\text{H}_2\text{O}:\text{CO}_2=1:1.3:0.7$ .

Initial data for calculating the combustion process of fuels are as follows: the excess air ratio is 1.1; the oxygen content in the air is 21 vol. %. Initial data on the composition of the initial fuel, the lower heat of combustion and other calculation results are presented in Table.

The results of calculations to determine the parameters  $P_l$  and  $P_c$  are shown in Figure.

Analysis of Figure, *a* shows that the combustion products of the methane-hydrogen mixture are comparable to the products of methane (natural gas) by the radiant heat transfer intensity  $P_l$ . Significantly different values  $P_l$  for hydrogen combustion products take place – below the corresponding value for natural gas combustion products by 21–22 %, and for thermochemical conversion gases – higher by 38–39 %. The maximum value  $P_c$  for flue gases at combustion of thermochemical conversion gases can be explained by the maximum value of the fraction of triatomic gases capable of transferring thermal energy in the form of radiation compared to the values characteristic of methane and methane-hydrogen mixture. The explanation for such small absolute numerical values  $P_l$  can be the element of the boiler selected for consideration (the small value of the thickness of the radiating layer, characteristic of the movement of combustion products in the convective heating surfaces). At the same time, the obtained results can be used for a qualitative comparison of the intensity of heat transfer by radiation of combustion products of different gaseous fuels.

When considering the indicator of the intensity of convective heat transfer  $P_c$  according to the data of calculations presented in Figure, *b*, the situation is slightly different. The maximum value  $P_c$  corresponds to the combustion products of natural gas and is 44  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , then in the ranking order there are thermochemical conversion gases, hydrogen and the minimum value corresponds to the use of methane-hydrogen mixture as a fuel.

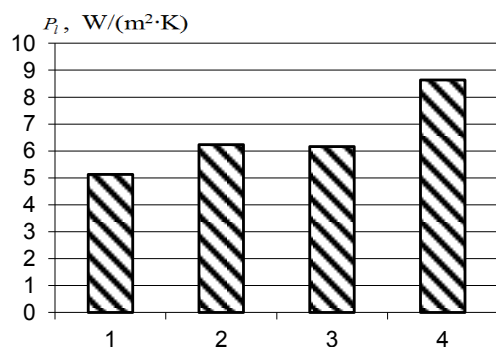
The value of the effective (total) heat transfer intensity factor for methane combustion products is 50 W/(m<sup>2</sup>·K). The minimum deviation in comparison with the products of natural gas combustion is in the products of combus-

tion of gases of thermochemical conversion +3,5 %, while for the methane-hydrogen mixture the deviation is –4,6 %, and for the products of hydrogen combustion it is already –5,8 %.

**Table.** Initial data and calculation results

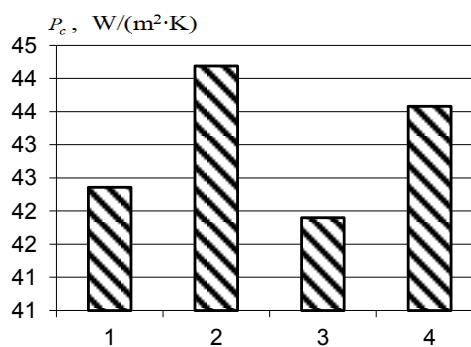
**Таблица.** Исходные данные и результаты расчета

Indicator Показатель	Measurement unit Единица измерения	Fuel/Топливо			
		hydrogen водород	methane метан	methane-hydrogen mixture (MXM) метано-водородная смесь (МВС)	thermochemical conversion gases (TCG) газы термохимической конверсии(ТХР)
Fuel composition/состав топлива					
H <sub>2</sub>	vol. %/об. %	100,00	—	40,00	51,53
CH <sub>4</sub>		—	100,00	60,00	0,01
CO <sub>2</sub>		—	—	—	5,56
CO		—	—	—	28,44
H <sub>2</sub> O		—	—	—	14,46
Net calorific value/Низшая теплота сгорания	kJ/m <sup>3</sup> /кДж/м <sup>3</sup>	10800	35820	25812	9164
Volume of combustion products Объем продуктов сгорания	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	3,160	11,641	7,849	2,728
Combustion products composition Состав продуктов сгорания					
N <sub>2</sub>	vol. %/об. %	65,44	71,06	73,78	60,63
O <sub>2</sub>		1,59	1,73	1,79	1,47
CO <sub>2</sub>		—	8,59	7,64	12,46
H <sub>2</sub> O		32,97	18,62	16,79	25,44
Fuel consumption/Расход топлива	m <sup>3</sup> /s/м <sup>3</sup> /с	0,200	0,060	0,083	0,236
Design temperature/Расчетная температура	K/K	1309	1212	1278	1251
Kinematic viscosity coefficient of the combustion products Коэффициент кинематической вязкости продуктов сгорания	m <sup>2</sup> /s/м <sup>2</sup> /с	218,3·10 <sup>-6</sup>	169,3·10 <sup>-6</sup>	185,3·10 <sup>-6</sup>	181,6·10 <sup>-6</sup>
Thermal conductivity coefficient of combustion products Коэффициент теплопроводности продуктов сгорания	W/(m·K) Вт/(м·K)	0,073	0,061	0,063	0,066
Rate of combustion products Скорость продуктов сгорания	m/s/м/с	39,87	40,80	40,12	38,22
Average beam length Средняя длина луча	m/м	0,0468	0,0468	0,0468	0,0468
Degree of blackness of combustion products Степень черноты продуктов сгорания	—	0,032	0,048	0,041	0,061



type of fuel / вид топлива

a



type of fuel / вид топлива

b

**Figure.** Dependence of the parameters of the radiant (a) and convective (b) heat exchange of the combustion products: 1 – hydrogen; 2 – methane; 3 – methane-hydrogen mixture; 4 – thermochemical conversion gases

**Рисунок.** Зависимость параметров лучистого (a) и конвективного (b) теплообмена продуктов сгорания: 1 – водорода; 2 – метана; 3 – метано-водородной смеси; 4 – газов ТХР

### Conclusions

On the basis of the performed assessment of the indicators of the intensity of radiant and convective heat ex-

change of the combustion products of various gaseous fuels, it can be replaced that the transition to hydrogen or a methane-hydrogen mixture in standard boiler units and other heat engineering and heat power installations is

complicated due to a change in the heat absorption of the corresponding heating surfaces and requires the introduction constructive changes in them or performance degradation. The closest in terms of the resulting heat transfer coefficient are the products of combustion of the products

of combustion of gases obtained by the method of thermochemical steam-hydrocarbon conversion.

*The research is funded by Russian Science Foundation grant (Project №19-19-00327).*

## REFERENCES

- Aminov R.Z., Bayramov A.N. *Kombinirovaniye vodorodnykh energeticheskikh tsiklov s atomnymi elektrostantsiyami* [Combining hydrogen energy cycles with nuclear power plants]. Moscow, Nauka Publ., 2016. 254 p.
- Mokrousov A.I., Sopin S.F., Kazaryan V.A., Ponomarev-Stepnoy N.N., Sizova Yu.A., Stolyarevsky A.Ya. *Kompleks po proizvodstvu, khraneniyu i raspredeleniyu vodoroda* [Complex for the production, storage and distribution of hydrogen]. Patent RF, no. 2713349, 2020.
- Jouhara H., Khordeghah N., Almahmoud S., Delpech B., Chauhan A., Tassou S.A. Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2018, vol. 6, pp. 268–289.
- Pashchenko D.I. Thermochemical recovery of heat contained in flue gases by means of bioethanol conversion. *Thermal Engineering*, 2013, vol. 60, no. 6, pp. 438–443.
- Martin J.-C., Millington P., Campbell B., Barron L., Fisher S. On-board generation of hydrogen to improve in-cylinder combustion and after-treatment efficiency and emissions performance of a hybrid hydrogen-gasoline engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, no. 25, pp. 12880–12889.
- Elitzur S., Rosenband V., Gany A. On-board hydrogen production for auxiliary power in passenger aircraft. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, vol. 42, no. 19, pp. 14003–14009.
- Jiang B., Santis-Alvarez A.J., Murali P., Poulikakos D., Borhani N., Thome J.R., Maeder T. Design and packaging of a highly integrated microreactor system for high-temperature on-board hydrogen production. *Chemical Engineering Journal*, 2015, vol. 275, pp. 206–219.
- Purnima P., Jayanti S. A high-efficiency, auto-thermal system for on-board hydrogen production for low temperature PEM fuel cells using dual reforming of ethanol. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, vol. 41, no. 31, pp. 13800–13810.
- Pashchenko D. Thermochemical recuperation by ethanol steam reforming: Thermodynamic analysis and heat balance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, vol. 44, no. 59, pp. 30865–30875.
- Pashchenko D. Thermochemical waste-heat recuperation as on-board hydrogen production technology. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, no. 57, pp. 28961–28968.
- Pashchenko D. Thermodynamic equilibrium analysis of steam methane reforming based on a conjugate solution of material balance and law action mass equations with the detailed energy balance. *International Journal of Energy Research*, 2020, vol. 44, no. 1, pp. 438–447.
- Pashchenko D. Industrial furnaces with thermochemical waste-heat recuperation by coal gasification. *Energy*, 2021, vol. 221, pp. 119864.
- Pashchenko D. Thermochemical waste-heat recuperation by steam methane reforming with flue gas addition. *International Journal of Energy Research*, 2019, vol. 43, no. 6, pp. 2216–2226.
- Pashchenko D. Experimental study of methane reforming with products of complete methane combustion in a reformer filled with a nickel-based catalyst. *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 183, pp. 159–166.
- Verkhivker G., Kravchenko V. The use of chemical recuperation of heat in a power plant. *Energy*, 2004, vol. 29, no. 3, pp. 379–388.
- Rue D., Kozlov A., Khinkis M., Kurek H. Thermochemical recuperation to increase glass furnace energy efficiency. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2014, vol. 35, no. 1, pp. 81–92.
- Maruoka N., Mizuochi T., Purwanto H., Akiyama T. Feasibility study for recovering waste heat in the steelmaking industry using a chemical recuperator. *ISIJ International*, 2004, vol. 44, no. 2, pp. 257–262.
- Gaber C., Demuth M., Prieler R., Schluckner C., Hochenauer C. An experimental study of a thermochemical regeneration waste heat recovery process using a reformer unit. *Energy*, 2018, vol. 155, pp. 381–391.
- Gaber C., Demuth M., Prieler R., Schluckner C., Schroettner H., Fitzek H., Hochenauer C. Experimental investigation of thermochemical regeneration using oxy-fuel exhaust gases. *Applied Energy*, 2019, vol. 236, pp. 1115–1124.
- Tartakovsky L., Sheintuch M. Fuel reforming in internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, vol. 67, pp. 88–114.
- Chakravarthy V.K., Daw C.S., Pihl J.A., Conklin J.C. Study of the theoretical potential of thermochemical exhaust heat recuperation for internal combustion engines. *Energy & Fuels*, 2010, vol. 24, no. 3, pp. 1529–1537.
- Poran A., Thawko A., Eyal A., Tartakovsky L. Direct injection internal combustion engine with high-pressure thermochemical recuperation – Experimental study of the first prototype. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, vol. 43, no. 27, pp. 11969–11980.
- Pashchenko D. Energy optimization analysis of a thermochemical exhaust gas recuperation system of a gas turbine unit. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 171, pp. 917–924.
- Popov S.K., Svistunov I.N., Garyaev A.B., Serikov E.A., Temyrkanova E.K. The use of thermochemical recuperation in an industrial plant. *Energy*, 2017, vol. 127, pp. 44–51.
- Pashchenko D. Hydrogen-rich fuel combustion in a swirling flame: CFD-modeling with experimental verification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, vol. 45, no. 38, pp. 19996–20003.
- Pechenegov Yu.Ya. *Sravnitelnye kharakteristiki teploobmena produktov sgoraniya gazov piroliza tverdogo topliva* [Comparative characteristics of heat transfer of products of combustion of gases of pyrolysis of solid fuels]. *Izvestiya vuzov SSSR – Energetika*, 1986, no. 11, pp. 78–81.
- Baklastov A.M., Gorbenko V.A., Danilov O.L. *Promyshlennyye teplomasoobmennyye protsessy i ustanovki* [Industrial heat and mass transfer processes and installations]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 328 p.
- Pechenegov Yu.Ya. *Raschet fizicheskikh svoystv, teploobmena i gidravlicheskogo soprotivleniya gazov i zhidkikh teplonositeley* [Calculation of physical properties, heat transfer and hydraulic resistance of gas and liquid coolants]. Saratov, Saratov State Technical University Publ., 2011. 116 p.
- Rid R., Shervud T. *Svoystva gazov i zhidkostey (opredelenie i korrelyatsiya)* [Properties of gases and liquids (definition and correlation)]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1964. 336 p.
- Teoreticheskiye osnovy teplotekhniki. Teplotekhnicheskiy eksperiment* [Theoretical foundations of heat engineering. Thermotechnical experiment]. Eds. A.V. Klimenko, prof. V.M. Zorin. Moscow, MEI Publ. house, 2021. 564 p.
- Lavrov N.V., Korobov V.V., Filippova V.I. *Termodinamika reaktsiy gazifikatsii i sinteza iz gazov* [Thermodynamics of reactions of gasification and synthesis from gases]. Moscow, Institute of fossil fuels Publ., 1960. 99 p.

Received: 14 December 2022.

Reviewed: 9 February 2023.

## Information about the authors

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

**Olga V. Afanaseva**, Cand. Sc., leading specialist, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

**Oleg Yu. Kuleshov**, Dr. Sc., professor, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A.



УДК 62-62

## РАСЧЕТ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ГАЗОВЫХ ТОПЛИВ

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

Афанасьева Ольга Валерьевна<sup>2</sup>,  
eccolga@mail.ru

Кулешов Олег Юрьевич<sup>1</sup>,  
o-yu-kul@yandex.ru

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

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого,  
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

**Актуальность** исследования обуславливается современным трендом в области теплотехники и теплотехники по переходу с традиционного газообразного топлива (метана) на использование водорода, метано-водородных смесей, а также газов термохимической конверсии. Перевод на новое неперспективное топливо обосновывается соображениями снижения негативного воздействия на окружающую среду и повышения тепловой эффективности топливосжигающих установок. При этом использование топлив с составом отличным от проектного повлияет на процессы теплообмена.

**Цель:** проведение сопоставительного анализа показателей интенсивности лучистого и конвективного теплообмена продуктов сгорания неперспективных топлив, таких как водород, метано-водородная смесь и газы термохимической конверсии. В качестве допущения при постановке задачи и целей исследования принято постоянство мощности тепловыделения в аппарате за счет изменения количества сжигаемого топлива.

**Объект:** теплообменная поверхность жаротрубного водогрейного котла.

**Методы:** проведение численного расчета с привлечением традиционных подходов по определению показателей интенсивности теплообмена в системе «продукты сгорания – металлическая стенка трубы теплотехнических установок». Также использованы апробированные ранее другими авторами соотношения для расчета теплофизических параметров газовых смесей.

**Результаты.** По результатам выполненных сравнительных расчетов можно заключить, что переход от использования традиционного топлива (природного газа/метана) к газам его термохимической конверсии в рассмотренных условиях практически не влияет на интегральные показатели теплоотдачи. В большей степени такой переход вызывает изменения интенсивности теплоотдачи для продуктов сгорания водорода и метано-водородной смеси, что повлияет на работу теплотехнических и теплотехнологических установок. Вместе с тем необходимо проводить дополнительные исследования по кинетике горения газов термохимической конверсии метана, их теплофизическим свойствам и пр., поскольку аппаратное оформление, тип применяемого катализатора и рабочие параметры процесса будут оказывать воздействие на состав получаемого синтез-газа.

### Ключевые слова:

конверсия, водород, метан, термохимическая регенерация, водогрейный котел, катализатор, синтез-газ, продукты сгорания, температура.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-19-00327).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аминов Р.З., Байрамов А.Н. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями. – М.: Наука, 2016. – 254 с.
2. Комплекс по производству, хранению и распределению водорода: пат. № 2713349 РФ; Бюл. № 4 от 04.02.2020.
3. Jouhara H., Khordehgah N., Almahmoud S., Delpech B., Chauhan A., Tassou S.A. Waste heat recovery technologies and applications // Thermal Science and Engineering Progress. – 2018. – V. 6. – P. 268–289.
4. Pashchenko D.I. Thermochemical recovery of heat contained in flue gases by means of bioethanol conversion // Thermal Engineering. – 2013. – V. 60. – № 6. – P. 438–443.
5. Martin J.-C., Millington P., Campbell B., Barron L., Fisher S. On-board generation of hydrogen to improve in-cylinder combustion and after-treatment efficiency and emissions performance of a hybrid hydrogen-gasoline engine // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – V. 44. – № 25. – P. 12880–12889.
6. Elitzur S., Rosenband V., Gany A. On-board hydrogen production for auxiliary power in passenger aircraft // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – V. 42. – № 19. – P. 14003–14009.
7. Jiang B., Santis-Alvarez A.J., Muralt P., Poulikakos D., Borhani N., Thome J.R., Maeder T. Design and packaging of a highly integrated microreactor system for high-temperature on-board hydrogen production // Chemical Engineering Journal. – 2015. – V. 275. – P. 206–219.
8. Purnima P., Jayanti S. A high-efficiency, auto-thermal system for on-board hydrogen production for low temperature PEM fuel cells using dual reforming of ethanol // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – V. 41. – № 31. – P. 13800–13810.
9. Pashchenko D. Thermochemical recuperation by ethanol steam reforming: Thermodynamic analysis and heat balance // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – V. 44. – № 59. – P. 30865–30875.
10. Pashchenko D. Thermochemical waste-heat recuperation as on-board hydrogen production technology // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – V. 46. – № 57. – P. 28961–28968.
11. Pashchenko D. Thermodynamic equilibrium analysis of steam methane reforming based on a conjugate solution of material balance and law action mass equations with the detailed energy balance // International Journal of Energy Research. – 2020. – V. 44. – № 1. – P. 438–447.

12. Pashchenko D. Industrial furnaces with thermochemical waste-heat recuperation by coal gasification // *Energy*. – 2021. – V. 221. – P. 119864.
13. Pashchenko D. Thermochemical waste-heat recuperation by steam methane reforming with flue gas addition // *International Journal of Energy Research*. – 2019. – V. 43. – № 6. – P. 2216–2226.
14. Pashchenko D. Experimental study of methane reforming with products of complete methane combustion in a reformer filled with a nickel-based catalyst // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – V. 183. – P. 159–166.
15. Verkhivker G., Kravchenko V. The use of chemical recuperation of heat in a power plant // *Energy*. – 2004. – V. 29. – № 3. – P. 379–388.
16. Rue D., Kozlov A., Khinkis M., Kurek H. Thermochemical recuperation to increase glass furnace energy efficiency // *Ceramic Engineering and Science Proceedings*. – 2014. – V. 35. – № 1. – P. 81–92.
17. Maruoka N., Mizuochi T., Purwanto H., Akiyama T. Feasibility study for recovering waste heat in the steelmaking industry using a chemical recuperator // *ISIJ International*. – 2004. – V. 44. – № 2. – P. 257–262.
18. Gaber C., Demuth M., Prieler R., Schluckner C., Hochenauer C. An experimental study of a thermochemical regeneration waste heat recovery process using a reformer unit // *Energy*. – 2018. – V. 155. – P. 381–391.
19. Gaber C., Demuth M., Prieler R., Schluckner C., Schroettner H., Fitzek H., Hochenauer C. Experimental investigation of thermochemical regeneration using oxy-fuel exhaust gases // *Applied Energy*. – 2019. – V. 236. – P. 1115–1124.
20. Tartakovsky L., Sheintuch M. Fuel reforming in internal combustion engines // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2018. – V. 67. – P. 88–114.
21. Chakravarthy V.K., Daw C.S., Pihl J.A., Conklin J.C. Study of the theoretical potential of thermochemical exhaust heat recuperation for internal combustion engines // *Energy & Fuels*. – 2010. – V. 24. – № 3. – P. 1529–1537.
22. Poran A., Thawko A., Eyal A., Tartakovsky L. Direct injection internal combustion engine with high-pressure thermochemical recuperation – Experimental study of the first prototype // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2018. – V. 43. – № 27. – P. 11969–11980.
23. Pashchenko D. Energy optimization analysis of a thermochemical exhaust gas recuperation system of a gas turbine unit // *Energy Conversion and Management*. – 2018. – V. 171. – P. 917–924.
24. Popov S.K., Svistunov I.N., Garyaev A.B., Serikov E.A., Temyrkanova E.K. The use of thermochemical recuperation in an industrial plant // *Energy*. – 2017. – V. 127. – P. 44–51.
25. Pashchenko D. Hydrogen-rich fuel combustion in a swirling flame: CFD-modeling with experimental verification // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2020. – V. 45. – № 38. – P. 19996–20003.
26. Печенегов Ю.Я. Сравнительные характеристики теплообмена продуктов сгорания газов пиролиза твердого топлива // *Известия вузов СССР – Энергетика*. – 1986. – № 11. – С. 78–81.
27. Промышленные тепломасообменные процессы и установки / А.М. Бакластов, В.А. Горбенко, О.Л. Данилов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.
28. Печенегов Ю.Я. Расчет физических свойств, теплообмена и гидравлического сопротивления газовых и жидких теплоносителей. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2011. – 116 с.
29. Рид, Р., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей (определение и корреляция). – М.: Гостоптехиздат, 1964. – 336 с.
30. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / под общ. ред. чл.-кор. РАН А.В. Клименко, проф. В.М. Зорина. – М.: ИД МЭИ, 2021. – 564 с.
31. Лавров Н.В., Коробов В.В., Филиппова В.И. Термодинамика реакций газификации и синтеза из газов. – М.: Ин-т горючих ископаемых, 1960. – 99 с.

Поступила 14.12.2022 г.

Прошла рецензирование: 09.02.2023 г.

#### Информация об авторах

**Мракин А.Н.**, кандидат технических наук, доцент, кафедра промышленной теплотехники, Институт энергетики, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

**Афанасьева О.В.**, кандидат технических наук, ведущий специалист, ИЦ «Центр компьютерного инжиниринга», Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого.

**Кулешов О.Ю.**, доктор технических наук, профессор, кафедра промышленной теплотехники, Институт энергетики, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

УДК 556.161:556.166

## АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА РЕКИ ЧУМЫШ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Самойлова Светлана Юрьевна<sup>1</sup>,  
bastet05@list.ru

Ловцкая Ольга Вольфовна<sup>1</sup>,  
lov@iwer.ru

Кудишин Алексей Васильевич<sup>1</sup>,  
avkudishin@yandex.ru

Арнаут Дарья Васильевна<sup>2</sup>,  
arnautdv@mail.ru

<sup>1</sup> Институт водных и экологических проблем СО РАН,  
Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

<sup>2</sup> Алтайский Государственный Университет,  
Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61.

**Актуальность** работы связана с необходимостью совершенствования методик среднесрочных прогнозов половодья в условиях недостаточности гидрометеорологической информации.

**Цель:** оценка возможности использования пространственно распределенных моделей атмосферных осадков для прогнозирования объема стока половодья; разработка стохастических моделей для прогноза объема и максимальных расходов половодья с использованием данных наблюдений сети Росгидромета и распределенных атмосферных осадков по данным реанализа и данных дистанционного зондирования земли высокого пространственного разрешения.

**Методы:** геоинформационный, комплексный географо-гидрометеорологический анализ, статистические методы (корреляционный и регрессионный анализ).

**Результаты.** Выполнена оценка атмосферного увлажнения бассейна р. Чумыш с использованием данных пространственно распределенных моделей атмосферных осадков и материалов наблюдений на метеорологических станциях; проанализирована связь сумм осадков с объемом стока и максимальными расходами половодья. Сравнительная оценка полученных зависимостей позволила выбрать наиболее значимые предикторы для построения уравнения множественной линейной регрессии. Разработана статистическая модель для прогноза объема и максимальных расходов половодья реки Чумыш в створе пгт Тальменка с использованием данных наблюдений сети Росгидромета и реанализов высокого пространственного разрешения.

### Ключевые слова:

Река Чумыш, зимние осадки, половодье, слой стока, максимальные расходы, статистическая модель множественной регрессии.

### Введение

В последние десятилетия на реках Сибири отмечается увеличение повторяемости опасных гидрологических явлений, связанных с половодьями и дождевыми паводками. Эта тенденция будет, вероятно, сохраняться в будущем, что связано с климатическими изменениями, антропогенным освоением территорий в зонах затопления и подтопления и с недостаточной надежностью прогнозов опасных гидрологических явлений [1]. В связи с этим совершенствование методик прогнозов стока и максимальных уровней половодья различной заблаговременности является одной из важных задач в развитии гидрологической науки.

В условиях длительной зимы основным фактором формирования половодья является снежный покров [2, 3]. Редкая сеть метеостанций на водосборах сибирских рек не позволяет интерполировать данные о снегозапасах на всю территорию бассейнов, особенно это касается предгорных и горных районов с крайне неоднородными ландшафтно-климатическими условиями. Одним из способов восполнения отсутствующей метеорологической информации для гидрологиче-

ских расчетов является использование мезомасштабных и глобальных моделей атмосферы [4], данных дистанционного зондирования земли (ДДЗ) [5–7], реанализов высокого пространственно-временного разрешения [8–10].

Традиционно долгосрочные прогнозы половодья строятся на разного рода эмпирических воднобалансовых зависимостях весеннего стока от запаса воды в снежном покрове перед началом снеготаяния, последующих осадков и характеристик водопоглотительной способности бассейна в конце зимы [2]. На практике этот подход реализуется в виде различных физико-статистических моделей [10–16]. В качестве первичных предикторов в подобных моделях используется имеющаяся гидрометеорологическая информация. В работах [17–19] представлен опыт использования данных реанализа в качестве предикторов прогнозных физико-статистических моделей с сосредоточенными параметрами для весеннего стока.

В данной работе нами была выполнена оценка пространственно распределенных атмосферных осадков по данным реанализа и ДДЗ и проанализирована возможность их использования для прогнозирования

объема стока и максимальных расходов половодья на правом притоке первого порядка Верхней Оби – р. Чумыш в замыкающем створе пгт Тальменка. Разработана статистическая модель множественной линейной регрессии для прогноза объема и максимальных расходов половодья с использованием данных наблюдений сети ГМС и пространственно распределенных моделей осадков.

#### Объект исследования

Река Чумыш является правым притоком I порядка р. Обь, имеет длину 644 км и площадь бассейна 23900 км<sup>2</sup>. Река образуется при слиянии рек Томь–Чумыш и Кара–Чумыш, берущих начало на восточном склоне Салаирского кряжа. Бассейн расположен в пределах юго-западной части Салаирского кряжа и Предсалаирской равнины, Бийско-Чумышской возвышенно-

сти. Абсолютные высоты бассейна в водораздельной части не превышают 600 м. Климат района умеренно континентальный. Средняя годовая температура по данным ГМС Тогул 0,5 °С, самый холодный месяц – январь (–17,5 °С), самый теплый – июль (18,4 °С). Переход среднесуточной температуры через 0 °С в среднем наблюдается во второй декаде апреля.

Несмотря на то, что большая часть бассейна находится на равнине, Салаирский кряж является орографическим барьером на пути юго-западного переноса воздушных масс, поэтому распределение атмосферных осадков по территории неравномерно. Среднее количество осадков на метеостанциях в лесостепной части бассейна – 450–500 мм, в низкорослой лесной части – 600–800 мм, при этом на зимний период (с ноября по март) приходится только 30–40 % осадков.

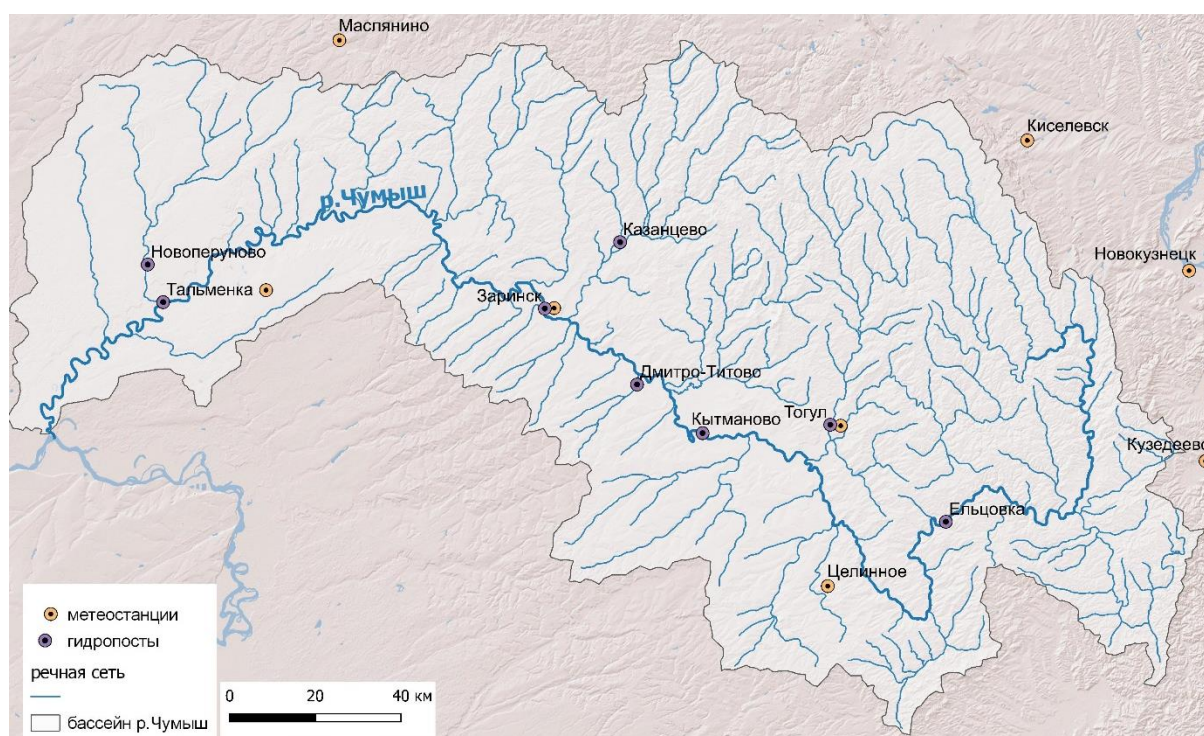


Рис. 1. Бассейн р. Чумыш. Метеорологическая и гидрологическая изученность

Fig. 1. The Chumysh river basin. Meteorological and hydrological exploration

В качестве замыкающего принят гидрологический пост в пгт Тальменка, расположенный в 74 км от устья, с площадью водосбора 20600 км<sup>2</sup> (86 % от общей площади речного бассейна). Наблюдения на посту ведутся с 1943 г. Питание реки преимущественно снеговое (70–80 % годового стока). Основной фазой водного режима реки является половодье, во время которого проходит от 49 до 81 % годового стока (рис. 2) [20].

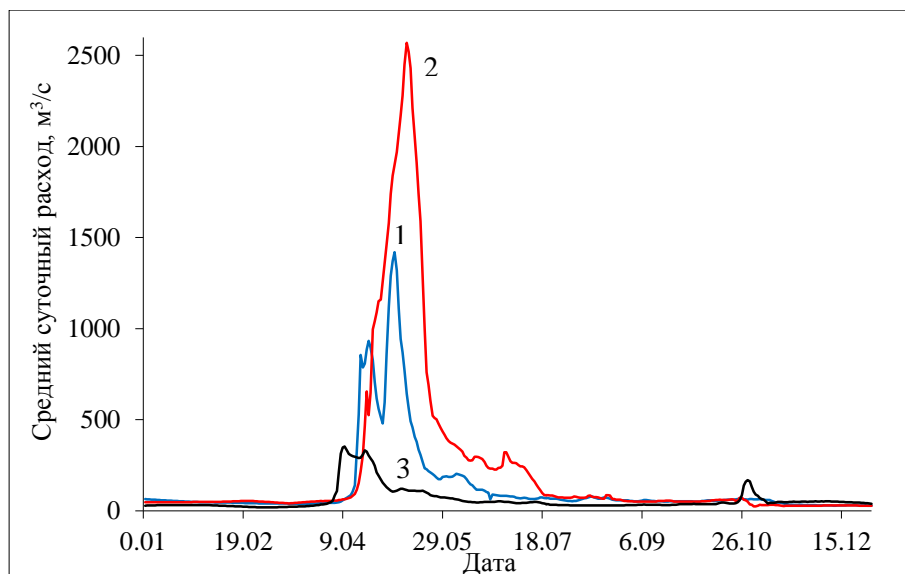
Половодье начинается, как правило, в первой декаде апреля и длится около двух месяцев, достигая максимума в апреле–мае. Сток реки отличается значительной внутри- и межгодовой изменчивостью. Максимальные расходы в маловодные и многоводные годы могут различаться в 5–7 раз. Средний многолет-

ний расход воды 130,2 м<sup>3</sup>/с, максимальный расход 2570 м<sup>3</sup>/с, минимальный 11,3 м<sup>3</sup>/с.

#### Исходные данные и методы исследования

##### Построение прогнозной модели

Для разработки прогноза объема стока и максимальных расходов половодья р. Чумыш реализована стандартная многофакторная статистическая модель (модель множественной линейной регрессии) [21]. В качестве предикторов использовались гидрометеорологические параметры, выбранные исходя из физических представлений о закономерностях формирования стока половодья. Отбор значимых предикторов осуществлялся путем анализа их корреляционной связи со слоем стока и максимальными расходами.



**Рис. 2.** Внутригодовое распределение стока: р. Чумыш – пгт Тальменка: 1 – год, близкий к среднему (1986), 2 – год, близкий к многоводному (1966), 3 – год, близкий к маловодному (2012)

**Fig. 2.** Annual distribution of runoff at gauge: the Chumysh river – Talmenka settlement: 1 – close to average year (1986), 2 – close to high-water year (1966), 3 – close to low-water year (2012)

Выбор предикторов для построения уравнения выполнялся пошаговой регрессией по мере уменьшения их влияния на сток. Для исключения эффекта мультиколлинеарности при наличии дублирующих факторов выбирался наиболее значимый, остальные исключались. Количество предикторов в уравнении ограничено критерием  $m/N \geq 10$ , где  $m$  – число предикторов,  $N$  – длина ряда [22].

Оценка качества построенных уравнений проводилась на независимом материале при помощи стандартного показателя отклонения среднеквадратической погрешности прогнозов к среднеквадратическому отклонению прогнозируемой величины  $S/\sigma$ , широко используемого в отечественной практике гидрологических прогнозов [23], где  $S$  и  $\sigma$  рассчитывались по формулам:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y}_i)^2},$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}, \quad (1)$$

$Y_i$  – фактическое значение гидрологической характеристики;  $\bar{Y}$  – среднее значение гидрологической характеристики;  $\tilde{Y}_i$  – расчетное значение, полученное при помощи модели.

Дополнительно оценивался показатель Нэша–Сатклиффа, также широко используемый в гидрологической практике [23–25] и рассчитываемый по формуле:

$$NSE = 1 - \frac{s^2}{\sigma^2} \left( \frac{n}{n-1} \right). \quad (2)$$

Исходные данные и их обработка

Данные пространственно распределенных моделей атмосферных осадков. ДДЗ3 и реанализы, получившие распространение с конца 1970-х гг., в насто-

ящее время являются дополнительными и/или альтернативными источниками пространственно распределенных метеоданных [26–29]. Доступные наборы данных об осадках с координатной привязкой различаются по размеру области покрытия, пространственному и временному разрешению, различаются источниками и методами их получения. В то время как глобальные и континентальные наборы данных предоставляют информацию об осадках в большой области и охватывают большой период времени, в них отсутствует высокое пространственное разрешение, необходимое для исследований в масштабе региона или водосбора. Данные высокого разрешения обычно доступны только на уровне страны или охватывают определенный географический регион [30].

Следует отметить недостаточный и нестабильный уровень точности всех наборов данных по осадкам. В зависимости от сезона и местоположения станции может наблюдаться как завышение, так и занижение количества осадков. Имеет место существенная ошибка в определении факта наличия осадков. Осадки зимой в средних широтах часто упускаются или оцениваются с большой неопределенностью [19].

В данной работе авторами не ставилась задача установления соответствия данных реанализов и материалов наблюдений сети ГМС. Этот вопрос подробно рассмотрен в работах [19, 31–33], в том числе применительно к исследуемой территории.

Для использования в гидрологических исследованиях и моделях необходимо предварительно оценить качество информации, получаемой из различных источников.

Из множества доступных данных для определения количества осадков, выпавших на водосборе, нами были выбраны следующие:

1. Сумма атмосферных осадков Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды из реанали-



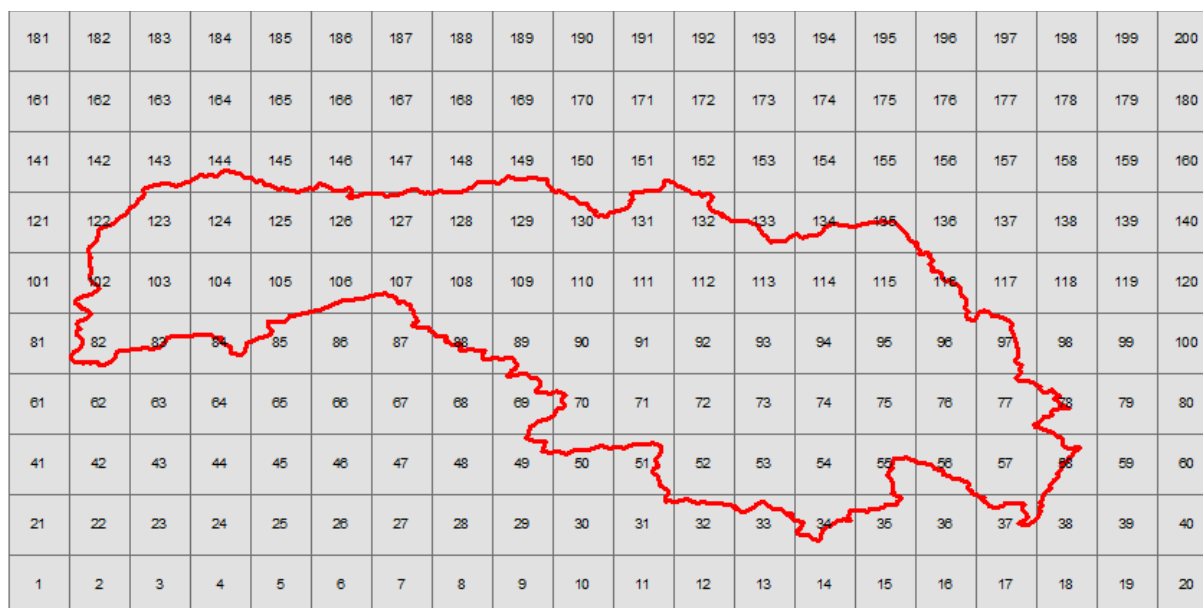
- за ERA-5 ECMWF высокого разрешения ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) за 1979–2019 гг. [34].
2. Скорректированные по материалам наблюдений на метеостанциях данные ERA-5 ECMWF (CRSS – Corrected Reanalysis for South Siberia), полученные в Институте мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН) [33].
  3. Данные метеорологического реанализа EWMBI с пространственным разрешением  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  за 1980–2016 гг. (проект ISIMIP2b [35]).
  4. Данные PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks – Climate Data Record на сетке  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  для полосы  $60^\circ\text{N}$ – $60^\circ\text{S}$  за период с 1.01.1983 г. по настоящее время [36].

Анализируемые данные поставляются в формате NetCDF, что позволяет обработать их по единому алгоритму. Геоинформационные системы ArcGIS, QGIS имеют встроенную поддержку формата netCDF и обеспечивают быстрый доступ к данным, не требуя их конвертирования. Для использования данных в модели прогноза объема и максимальных расходов половодья разработан алгоритм расчета временной

изменчивости осадков в целом по водосборному бассейну.

Алгоритм реализован в виде следующих блоков:

1. С использованием инструмента Create FishNet набора инструментов DataManagement Tools (Feature Class) построена сетка с размером ячейки, соответствующим набору данных модели атмосферных осадков (рис. 3).
2. Вычислены площади попадающих в бассейн ячеек (рис. 3).
3. С использованием инструмента «Представление таблицы NetCDF» (Make NetCDF Table View) набора инструментов «Инструменты Многомерных данных» (ArcGIS) для водосбора р. Чумыш созданы таблицы данных следующей структуры: дата, координаты (в десятичных градусах) центра ячейки сетки, количество осадков.
4. Таблицы, полученные на этапах 2 и 3, объединены по ключевым полям: координатам центров ячеек сетки.
5. Рассчитано средневзвешенное по площади количество осадков, выпадающих на территорию бассейна.



**Рис. 3.** Расчетная сетка для бассейна р. Чумыш в проекции WGS84 (размер ячейки  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ )

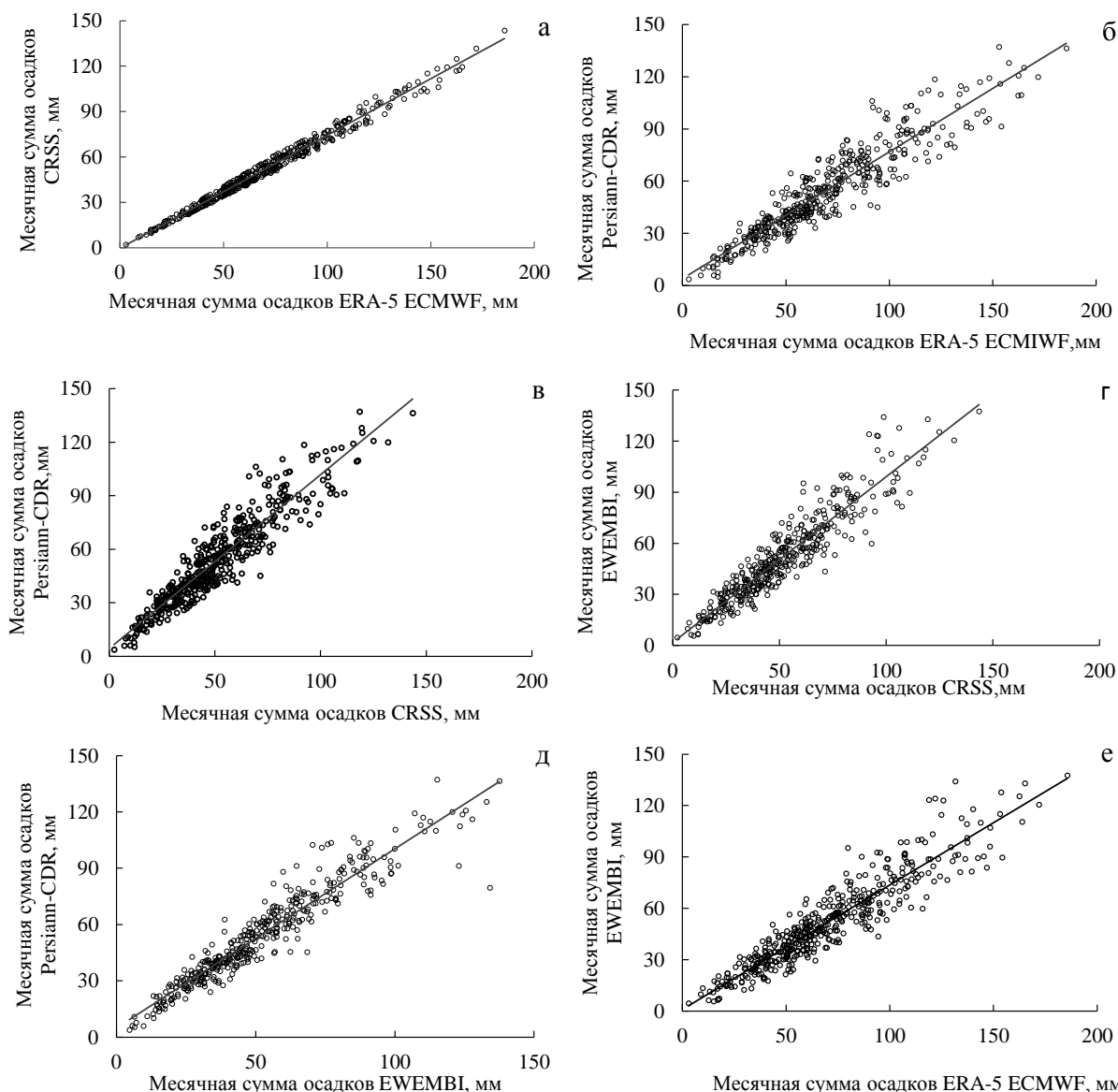
**Fig. 3.** Calculation grid for the Chumysh river basin in WGS84 projection (cells size is  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ )

На рис. 4, а–е показаны результаты сравнения сумм месячных значений количества осадков, выпавших на водосбор р. Чумыш, рассчитанных по пересчитанным источникам.

Рис. 4, б–е иллюстрируют хорошую связь между данными, полученными из различных источников, с коэффициентами детерминации ( $R^2$ ) от 0,86 до 0,9. Рис. 4, а ожидаемо показывает коэффициент детерминации, близкий к 1, т. к. используемые данные получены из одного источника. Угол наклона линии тренда изменяется от 0,73 (рис. 4, в) до 0,97 (рис. 4, е), что свидетельствует о близких значениях исследуемых данных, тем не менее меньшие значения угла

наклона линии тренда характерны для пар, содержащих исходные значения реанализа ERA-5 ECMWF.

**Данные гидрометеорологической сети.** В качестве потенциальных предикторов для составления прогнозной физико-стохастической модели рассмотрены 54 показателя, характеризующие термический режим и атмосферное увлажнение бассейна с декадным и месячным разрешением, полученные на метеостанциях, расположенных в пределах бассейна р. Чумыш либо в непосредственной близости от него и имеющих непрерывный ряд наблюдений за период 1980–2018 гг.: Тальменка, Заринск, Тогул, Целинное, Троицкое, Маслянино, Кузедеево и Новокузнецк (рис. 1).



**Рис. 4.** Сравнение месячного количества осадков для бассейна р. Чумыш, вычисленного по данным ДЗЗ и реанализов: а)  $y=0,75x-0,26$ ,  $R^2=0,986$ , где  $x$  – месячная сумма осадков ERA-5 ECMWF,  $y$  – месячная сумма осадков CRSS; б)  $y=0,73x+3,99$ ,  $R^2=0,867$ , где  $x$  – месячная сумма осадков ERA-5 ECMWF,  $y$  – месячная сумма осадков Persiann-CDR; в)  $y=0,97x+4,44$ ,  $R^2=0,872$ ,  $x$  – месячная сумма осадков CRSS,  $y$  – месячная сумма осадков Persiann-CDR; г)  $y=0,97x+1,65$ ,  $R^2=0,867$ ,  $x$  – месячная сумма осадков CRSS,  $y$  – месячная сумма осадков EWEMBI; д)  $y=0,95x+4,99$ ,  $R^2=0,905$ ,  $x$  – месячная сумма осадков EWEMBI,  $y$  – месячная сумма осадков Persiann-CDR; е)  $y=0,73x+1,01$ ,  $R^2=0,865$ ,  $x$  – месячная сумма осадков ERA-5 ECMWF,  $y$  – месячная сумма осадков EWEMBI;  $R^2$  – коэффициент детерминации

**Fig. 4.** Comparison of monthly precipitation for the Chumysh river basin calculated from remote sensing data and reanalysis a)  $y=0,75x-0,26$ ,  $R^2=0,986$ , where  $x$  is the monthly precipitation ERA-5 ECMWF,  $y$  is the monthly precipitation CRSS; б)  $y=0,73x+3,99$ ,  $R^2=0,867$ , where  $x$  is the monthly precipitation ERA-5 ECMWF,  $y$  is the monthly precipitation Persiann-CDR; в)  $y=0,97x+4,44$ ,  $R^2=0,872$ , where  $x$  is the monthly precipitation CRSS,  $y$  is the monthly precipitation Persiann-CDR; г)  $y=0,97x+1,65$ ,  $R^2=0,867$ , where  $x$  is the monthly precipitation CRSS,  $y$  is the monthly precipitation EWEMBI; д)  $y=0,95x+4,99$ ,  $R^2=0,905$ , where  $x$  is the monthly precipitation EWEMBI,  $y$  is the monthly precipitation Persiann-CDR; е)  $y=0,73x+1,01$ ,  $R^2=0,865$ , where  $x$  is the monthly precipitation ERA-5 ECMWF,  $y$  is the monthly precipitation EWEMBI;  $R^2$  is the coefficient of determination

Расчет слоя стока и максимальных расходов половодья выполнен на основе данных о расходах воды р. Чумыш в створе пгт Тальменка с суточным разрешением за март–июль. Для характеристики меженного стока за предшествующий осенне-зимний период использовались средние месячные расходы воды с ок-

тября по март. Гидрологические характеристики половодья (сроки, слой стока, максимальный среднесуточный расход) за период с 1980–2018 гг. определялись стандартными методами при помощи анализа комплексных графиков, включающих гидрографы стока половодья по гидропосту в пгт Тальменка



(р. Чумыш) и графики суточного хода температуры и осадков по репрезентативной метеостанции ГМС Тогул. Для исключения влияния жидких осадков в период половодья для каждого года отдельно рассчитан слой талого стока, определенный путем «срезки» дождевых паводков на спаде половодья (осадки, выпадающие до окончания снеготаяния, включались в талый сток, поскольку условия их стекания схожи).

### Результаты и обсуждение

Выбор предикторов для оценки зимних осадков в бассейне р. Чумыш

Как указывалось выше, главным предиктором при разработке прогноза слоя стока и максимальных расходов половодья являются запасы воды, накопленные в речном бассейне за предшествующий зимний период. Поэтому на первом этапе был выполнен отбор наиболее значимых предикторов, характеризующих основной стокоформирующий фактор. Для этого была построена и проанализирована корреляционная матрица, включающая следующие предикторы: пространственно распределенные зимние осадки, полученные в результате обработки ДДЗЗ и реанализов высокого разрешения; данные гидрометеорологической сети, включая следующие показатели:

- суммы зимних осадков по данным метеостанций Тальменка, Тогул, Заринск, Целинное, Троицкое, Маслянино, Кузедеево, Новокузнецк;
- максимальные запасы воды в снеге по данным метеостанций Тальменка, Тогул, Маслянино, Кузедеево.

Дата максимальных снегозапасов определялась для каждого года, при этом использовались данные лесных снегомерных маршрутов, для которых метелевый перенос характерен в меньшей степени, чем для полевых.

Под суммой зимних осадков подразумеваются осадки за период с 1 ноября по 31 марта включительно. Временные рамки ограничены наличием пространственно распределенных данных и охватывали гидрологические годы с 1979–1980 по 2017–2018.

В качестве предиктантов взяты слой стока половодья (общий и со «срезкой» дождевых паводков, характеризующий талую составляющую гидрографа); максимальные расходы половодья в створе р. Чумыш – пгт Тальменка.

Результаты корреляционного анализа зимних осадков и стока половодья представлены в табл. 1. Проверка достоверности коэффициентов корреляции выполнена по критерию Стьюдента.

Гипотеза о наличии корреляции проверяется на основании  $t$ -распределения с  $(n-2)$  степенями свободы по формуле

$$t_{\text{расч}} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}.$$

При  $t_{\text{расч}} > t_{n-2, \alpha}$  принимается, что коэффициент корреляции значимо отличается от нуля. В нашем случае  $(n-2)=37$ ,  $\alpha=0,05$ ,  $t_{37,0,05}=2,026$ .

Расчетные значения  $t$  в табл. 1 приведены через дробь.

**Таблица 1.** Коэффициенты корреляции  $r$  связи слоя стока и максимальных расходов половодья (р. Чумыш – пгт Тальменка) с суммой зимних осадков

**Table 1.** Correlation coefficients  $r$  for the relation of runoff depth and maximum discharge of flood (Chumysh river – Talmenka settlement) with total winter precipitation

Предикторы/Predictors		Предиктанты/Predictants		
		Слой стока половодья, мм Runoff depth, mm	Слой стока половодья со «срезкой» паводков, мм Runoff depth with flood peak reduction, mm	Максимальный среднесуточный расход, м³/с Maximum average daily discharge, m³/s
Сумма зимних осадков (XI–III) по данным метеостанций, мм Total winter precipitation (XI–III) according to weather stations, mm	Тальменка/Talmenka	0,46/3,15	0,6/4,56	0,43/2,9
	Заринск/Zarinsk	0,34/2,2	0,54/3,9	0,35/2,27
	Тогул/Togul	0,53/3,8	0,61/4,68	0,33/2,13
	Целинное/Tselinnoe	0,31/1,98	0,4/2,65	0,13/0,8
	Троицкое/Troitskoe	0,47/3,24	0,57/4,22	0,43/2,9
	Маслянино/Maslyanino	0,44/2,98	0,6/4,56	0,36/2,35
	Кузедеево/Kuzedeevo	0,4/2,65	0,48/3,33	0,17/1,05
Максимальные запасы воды в снежном покрове, мм Maximum water reserves in snow cover, mm	Новокузнецк/Novokuznetsk	0,43/2,90	0,51/3,61	0,24/1,5
	Маслянино/Maslyanino	0,46/3,15	0,59/4,44	0,45/3,07
	Тальменка/Talmenka	0,41/2,73	0,57/4,22	0,36/2,35
	Тогул/Togul	0,44/2,98	0,51/3,61	0,39/2,58
Сумма зимних осадков (XI–III) по распределенным моделям, мм Total winter precipitation (XI–III) according to distributed models, mm	Кузедеево/Kuzedeevo	0,4/2,65	0,4/2,65	0,35/2,27
	ERA-5 ECMWF (исходные)/(source)	0,55/4,01	0,67/5,49	0,5/3,51
	ERA-5 ECMWF (скорректированные)/(adjusted)	0,55/4,01	0,66/5,34	0,5/3,51
	Persiann-CDR	0,51/3,61	0,67/5,49	0,39/2,58
	EWEMBI	0,49/3,42	0,63/4,93	0,41/2,73

Примечания: 1. Значения коэффициентов корреляции, соответствующие «заметной» и «тесной» связи (коэффициент корреляции более 0,5), выделены курсивом. 2. Значения  $t$ -критерия для коэффициентов корреляции  $r$  приведены через дробь «/».

Notes: 1. Correlation coefficients corresponding to «significant» and «strong» relationships (the correlation coefficient exceeds 0,5) are given in italics. 2. The values of the  $t$ -test for the correlation coefficients  $r$  are entered through the fraction «/».

Степень тесноты связи по результатам расчета коэффициентов корреляции оценивалась по шкале Чеддока (Chaddock Scale) (табл. 2) [37].

**Таблица 2.** Качественная оценка тесноты связи по результатам расчета коэффициентов корреляции Пирсона ( $r$ )

**Table 2.** Qualitative interpretation of strength of association for Pearson correlation coefficient ( $r$ )

Коэффициент корреляции Correlation	Теснота связи Strength of association
0,1...0,3	слабая/weak
0,3...0,5	умеренная/moderate
0,5...0,7	заметная/significant
0,7...0,9	тесная/strong
0,9...0,99	очень тесная/very strong

Корреляционный анализ показал:

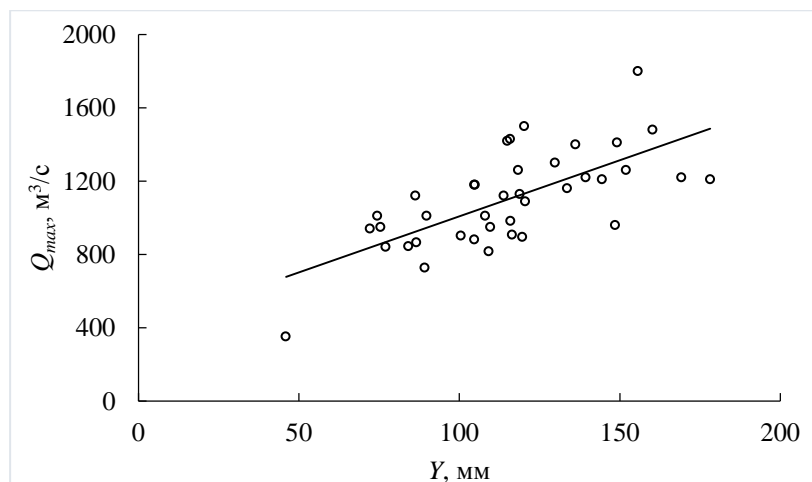
- «срезка» дождевых паводков ожидаемо улучшила качество связи слоя стока и зимних осадков;
- распределенные данные лучше коррелируют со стоком половодья, поэтому их использование в качестве предиктора для построения прогнозной модели предпочтительнее;
- объем стока половодья в целом лучше коррелирует с суммой зимних осадков, чем максимальные расходы. Это ожидаемо, поскольку на формирование максимальных расходов дополнительно

оказывает значительное влияние интенсивность снеготаяния в бассейне и, как следствие, скорость поступления талых вод в речную сеть.

Разработка модели множественной линейной регрессии для прогноза слоя стока и максимальных расходов половодья на р. Чумыш – пгт Тальменка

Известно, что на сток половодья, помимо снегозапасов, влияют такие факторы, как жидкие осадки, выпавшие в период половодья, а также группа факторов, определяющих водопоглощающую емкость бассейна [2, 10, 38]. Максимальные расходы воды формируются в основном за счет тех же факторов, однако на них в значительной степени оказывает влияние интенсивность и ход снеготаяния в бассейне и, как следствие, скорость поступления талых вод в речную сеть.

Как правило, между максимальными расходами воды и слоем стока существует достаточно тесная связь, поэтому долгосрочный прогноз максимального расхода воды строится на основе долгосрочного стока за половодье и реализуется в виде зависимости вида  $Q_{max} = f(Y)$ , где  $Q_{max}$  – максимальный расход воды, а  $Y$  – ожидаемый сток за период половодья [2]. Для оценки применимости данного подхода к р. Чумыш проанализирована связь максимальных расходов  $Q_{max}$  и слоя стока половодья  $Y$  (рис. 5).



**Рис. 5.** Зависимость максимального расхода воды от стока за период половодья р. Чумыш – пгт Тальменка ( $y=6,11x+369,9$ , где  $x$  – слой стока половодья ( $Y$ , мм);  $y$  – максимальный расход ( $Q_{max}$ ,  $m^3/s$ ), коэффициент детерминации  $R^2=0,47$ )

**Fig. 5.** Flood runoff dependence of maximum discharge at the Chumysh river – Talmenka settlement ( $y=6,11x+369,9$ , where  $x$  is the flood runoff depth ( $Y$ , mm);  $y$  is the maximum water discharge ( $Q_{max}$ ,  $m^3/s$ ), the coefficient of determination  $R^2=0,47$ )

Как видно из рис. 5, коэффициент детерминации  $R^2$ , характеризующий зависимость, составляет 0,47, что свидетельствует о невозможности ее использования для прогноза максимальных расходов. Очевидно, главные факторы, определяющие формирование стока и максимальных расходов, будут различными. Таким образом, разработано два уравнения множественной линейной регрессии – для прогноза объема стока и максимальных расходов за половодье.

В качестве предикторов для построения прогнозных уравнений рассматривались метеорологические данные, прямо или косвенно характеризующие весеннее увлажнение и состояние грунтов в бассейне. В качестве индекса предзимнего увлажнения бассейнов рек часто применяется паводочный осенний либо осенне-зимний сток [12, 13, 38, 39], в данном случае – средние месячные расходы воды за октябрь и ноябрь в створе р. Чумыш – пгт Тальменка. Для характери-

стики осадков периода половодья так же, как и для зимних осадков, использовались данные метеостанций и распределенных моделей.

Таким образом, на этапе отбора значимых предикторов построена и проанализирована корреляционная матрица, состоящая из 54 предикторов и включающая, помимо распределенных данных о зимних осадках, следующие показатели:

- 1) средние месячные температуры воздуха на репрезентативной метеостанции (ГМС Тогул) с начала половодья до окончания снеготаяния (апрель, апрель–май) и за октябрь предыдущего года, а также среднесезонные температуры за зимний период (ноябрь–март);
- 2) суммы осадков за период половодья (отдельно за апрель и за апрель–май), а также за октябрь предыдущего года по данным метеонаблюдений (ГМС Тальменка, Тогул, Заринск, Целинное, Троицкое, Новокузнецк, Маслянино, Кузнецово);
- 3) суммы осадков за аналогичные периоды, рассчитанные по распределенным моделям ERA-5 ECMWF, Persiann-CDR, EWMBI, CRSS;
- 4) средний месячный расход воды р. Чумыш – пгт Тальменка за октябрь и ноябрь.

Для оценки *слоя стока половодья* значимыми предикторами являются (в порядке убывания значимости):

- сумма осадков за апрель–май по ГМС Тогул,  $r=0,59$  (что выше, чем по данным распределенных моделей, имеющих  $r=0,42–0,51$ );
- сумма зимних осадков (XI–III) по данным реанализа ERA-5 ECMWF,  $r=0,55$ ;
- средний расход воды р. Чумыш за октябрь ( $r=0,49$ ).

Для оценки *максимальных расходов* использованы следующие предикторы (также в порядке убывания значимости):

- средний расход воды р. Чумыш за октябрь ( $r=0,54$ );
- сумма зимних осадков (XI–III) по данным реанализа CRSS ( $r=0,5$ );
- сумма осадков за апрель–май по ГМС Тальменка ( $r=0,34$ ).

«Заметная» связь слоя стока с осадками апреля и мая (табл. 2) свидетельствует о том, что источником питания р. Чумыш в период половодья выступают дождевые и талые воды, причем степень их влияния на объем половодья примерно одинакова. Третий предиктор – среднемесячный расход воды за октябрь, перед ледоставом, является индикатором влагонасыщенности бассейна, а также характеризует грунтовое питание реки.

Таким образом, наряду с зимне-весенними осадками, одним из определяющих факторов формирования половодья на р. Чумыш является состояние почвогрунтов в бассейне (в первую очередь, их увлажнение), которое в конечном счете обуславливает его водопоглощающую емкость и, как следствие, коэффициенты талого стока.

Необходимо отметить, что упомянутый фактор является главным при формировании максимальных

расходов, что, очевидно, связано с возможностью впитывания талых вод почвогрунтами и скоростью их поступления в речную сеть.

Зимние и весенние температуры, характеризующие соответственно суровость зимы и скорость снеготаяния, существенного влияния на объем стока и максимальные расходы половодья не оказывают. Их корреляционная связь характеризуется «слабой теснотой связи» ( $r$  не более  $|0,17|$ ). Отмечается слабая отрицательная связь средней температуры октября предшествующего года со слоем стока ( $r=-0,3$ ) и максимальными расходами ( $r=-0,37$ ), однако включение данного предиктора в уравнения не улучшило их качество.

Таким образом, уравнение множественной линейной регрессии для прогноза слоя стока половодья имеет вид:

$$Y = 0,29X_{IV-VI} + 0,34X_{XI-III} + 0,41Q_X - 22.$$

Для максимальных расходов:

$$Q_{max} = 5,37Q_X + 3,3X_{XI-III} + 1,32X_{IV-VI} - 57,8,$$

где  $Y$  – слой стока периода половодья, мм;  $X_{IV-VI}$  – осадки за апрель–май ГМС Тогул (для уравнения (1)) и ГМС Тальменка (для уравнения (2));  $X_{XI-III}$  – сумма зимних осадков (XI–III) по данным реанализа ERA-5 ECMWF (для уравнения (2) – данные CRSS);  $Q_X$  – средний расход воды р. Чумыш за октябрь.

Статистические характеристики прогнозных уравнений приведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Статистические характеристики уравнений множественной регрессии для прогнозирования слоя стока и максимальных расходов половодья на р. Чумыш

**Table 3.** Statistical characteristics of multiple regression equations for predicting runoff depth and maximum discharge of the river Chumysh flood

Итоговые статистики Summary statistics	Модель 1: $Y$ Model 1: $Y$	Модель 2: $Q_{max}$ Model 2: $Q_{max}$
Множественный $R$ /Multiple $R$	0,8	0,72
$R^2$	0,63	0,53
Нормированный $R^2$ /Adjusted $R^2$	0,60	0,49
Стандартная ошибка Standard error	18,45	187,2
$F$ -критерий/ $F$ -test	20,3	13
$S/\sigma$	0,62	0,71
$NSE$	0,60	0,47
Количество наблюдений Observations	39	39

Значение  $F$  (критерий Фишера) превышает табличное значение (при уровне значимости 0,05), что свидетельствует об адекватности полученных уравнений регрессии.

В соответствии с [24], при  $n \geq 25$  методика может быть признана хорошей, если  $S/\sigma \leq 0,5$ ; удовлетворительной при  $0,5 < S/\sigma \leq 0,8$ ; неудовлетворительной при  $S/\sigma > 0,8$ .

По показателю Нэша–Сатклиффа «модель может считаться хорошей при  $NSE \geq 0,8$ ; удовлетворительной при условии  $0,36 < NSE \leq 0,8$ ; неудовлетворительной при условии  $NSE < 0,36$ » [23. С. 180].

Таким образом, по обоим показателям модель может характеризоваться как удовлетворительная.

#### Выводы

1. При построении стохастической модели максимального стока р. Чумыш в качестве предиктора, характеризующего зимние осадки (снегозапасы) в бассейне р. Чумыш, целесообразно использование распределенных данных реанализов высокого пространственного разрешения. Это обосновано тем, что они существенно лучше коррелируют (более высокие коэффициенты корреляции  $r$ ) с параметрами половодья, чем данные снегомерных съемок и суммы зимних осадков, полученные на ГМС. Это ожидаемо, так как точечные наблюдения на метеостанциях не могут характеризовать осадки на всей территории бассейна. ДДЗ, при всех недостатках, ориентированы на оценку именно пространственного распределения и в целом лучше подходят для оценки выпавших на бассейн осадков. Проведенный сравнительный анализ пространственных моделей распределения осадков показал хорошую корреляцию между ними, что позволяет использовать любой набор данных при построении регрессионных моделей «осадки–сток». Но наилучший результат (наиболее высокие коэффициенты корреляции) показали данные модели ERA-5 ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) как в их исходном варианте, так и с учетом корректировки [33].

Источником питания р. Чумыш в период половодья выступают в равной степени дождевые и талые воды, о чем свидетельствует «заметная» теснота связи слоя стока как со снегозапасами ( $r=0,55$ ), так и с осадками апреля и мая ( $r=0,59$ ).

Одним из определяющих факторов формирования половодья на р. Чумыш (а для формирования максимальных расходов – главным) является состояние почвогрунтов в бассейне (в первую очередь, их увлажнение), которое в конечном счете обуславливает водопоглощающую емкость и, как следствие, коэффициенты талого стока и скорость впитывания талых вод. Об этом свидетельствует «умеренная» ( $r=0,49$ ) и «заметная» ( $r=0,54$ ) теснота связи слоя стока и максимальных расходов воды половодья со среднемесячным расходом воды за октябрь, который является индикатором влагонасыщенности бассейна.

2. Ни зимние, ни весенние температуры, характеризующие суровость зимы и скорость снеготаяния, значимого влияния на объем стока и максимальные расходы половодья не оказывают, так как их корреляционная зависимость характеризуется «слабой теснотой связи» ( $r$  не более  $|0,17|$ ). Отмечается «слабая» отрицательная связь средней температуры октября предшествующего года со слоем стока ( $r=-0,3$ ) и максимальными расходами ( $r=-0,37$ ), однако включение данного предиктора в уравнения регрессии не улучшило их качество.
3. Разработана стохастическая модель множественной линейной регрессии для прогноза объема и максимальных расходов воды в створе р. Чумыш – пгт Тальменка, которая по показателям  $S/\sigma$  и критерию Нэша–Сатклиффа может характеризоваться как удовлетворительная.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (проект «Изучение механизмов природных и антропогенных изменений количества и качества водных ресурсов Сибири с использованием гидрологических моделей и информационных технологий»).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опасные гидрологические явления в бассейне Верхней Оби: Современные тенденции и прогнозирование / А.В. Пузанов, А.Т. Зиновьев, Д.М. Безматерных, В.Ф. Резников, Д.Н. Трошкин // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2018. – № 4. – С. 69–77.
2. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 422 с.
3. Identifying sensitivities in flood frequency analyses using a stochastic hydrologic modeling system / A.J. Newman, A.G. Stone, M. Saharia, K.D. Holman, N. Addor, M.P. Clark // Hydrology and Earth System Sciences. – 2021. – V. 25. – P. 5603–5621. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-25-5603-2021> (дата обращения 01.12.2022).
4. Пьянков С.В., Шихов А.Н. Геоинформационное обеспечение моделирования гидрологических процессов и явлений. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2017. – 148 с.
5. Ромасько В.Ю., Бураков Д.А. Космический мониторинг заснеженности территории речных бассейнов // Журнал СВУ. Техника и технологии. – 2017. – Т. 10 (6). – С. 704–713. URL: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-6-704-713> (дата обращения 01.12.2022).
6. Application and assessment of a downscaled GPM dataset in the simulation of snowmelt runoff in alpine mountainous areas / Y. Zhang, G. Hanati, S. Danierhan, H. Keke // Journal of Hydrology: Regional Studies. – V. 41. – June 2022. – 10110. URL: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-6-704-713> (дата обращения 01.12.2022).
7. The evaluation of the potential of global data products for snow hydrological modelling in ungauged high-alpine catchments / M. Weber, F. Koch, M. Bernhardt, K. Schulz // Hydrology and Earth System Sciences. – 2021. – V. 25. – P. 2869–2894. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-25-2869-2021> (дата обращения 01.12.2022).
8. Морейдо В.М., Калугин А.С. Оценка возможных изменений водного режима реки Селенги в XXI в. На основе модели формирования стока // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44. – № 3. – С. 275–284. URL: <https://doi.org/10.7868/S0321059617030142> (дата обращения 01.12.2022).
9. Насонова О.Н., Гусев Е.М., Ковалев Е.Э. Воспроизведение гидрографов стока северных рек с использованием глобальных баз данных // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2012. – № 5. – С. 61–70. URL: <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2012-5-61-70> (дата обращения 01.12.2022).
10. Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Assessment of applicability of Mike 11-nam hydrological module for rainfall runoff modelling in a poorly studied river basin // Vestnik MGSU. – 2020. – V. 15. – № 7. – P. 1030–1046. URL: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.7.1030-1046> (дата обращения 01.12.2022).
11. Галахов В.П., Самойлова С.Ю., Мардасова Е.В. Оценка количества зимних осадков в горных бассейнах и их влияние на сток во время половодья (на примере рек Чарыш и Ануй, Алтай) // Криосфера Земли. – 2021. – Т. 25. – № 6. – С. 51–62. URL: <https://doi.org/10.15372/KZ20210605> (дата обращения 01.12.2022).
12. Мухин В.М. Методические основы физико-статистических видов краткосрочных прогнозов стока горных рек // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2013. – № 349. – С. 5–46.
13. Паромов В.В., Шумилова К.А., Гордеев И.Н. Условия формирования половодья большой водности и прогноз наводнения на реке Абакан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 11. – С. 57–67.

14. Прогнозирование притока воды в Красноярское и Саяно-Шушенское водохранилища во втором квартале года / Д.А. Бураков, И.Н. Гордеев, А.В. Игнатов, О.Э. Петкун, Л.А. Путинцев, А.А. Чекартаев // География и природные ресурсы. – 2016. – № 2. – С. 175–182.
15. Бураков Д.А., Космакова В.Ф., Волковская Н.П. Методы долгосрочного прогноза максимальных уровней воды на реке Иртыш и результаты их испытания // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2019. – № 46. – С. 71–78.
16. О прогнозе максимальных расходов весеннего половодья реки Арпа / В.Г. Маргарян, Е.В. Гайдукова, Л.В. Азизян, В.А. Хаустов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2022. – № 3. – С. 75–87. URL: [https://doi.org/10.35567/19994508\\_2022\\_3\\_6](https://doi.org/10.35567/19994508_2022_3_6) (дата обращения 01.12.2022).
17. Прогноз притока воды к цимлянскому водохранилищу в период половодья в современных климатических условиях: проблемы и воспроизводимость / Н.А. Варенцова, М.Б. Киреева, Н.Л. Фролова, М.А. Харламов, В.П. Илич, А.А. Сазонов // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47. – № 6. – С. 694–709. URL: <https://doi.org/10.31857/S0321059620060152> (дата обращения 01.12.2022).
18. Холматов Ш.Р., Сарафанов М.И., Холматов Ш.Р. Прогнозирование уровня воды во время половодья с использованием данных «NASA global land data assimilation system» на примере реки Печора // Colloquium-Journal. – 2019. – № 17-1 (41). – С. 29–32. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognostirovaniye-urovnya-vody-vo-vremya-polovodya-s-ispolzovaniem-dannyh-nasa-global-land-data-assimilation-system-na-primere-reaki-pechora> (дата обращения: 13.09.2022).
19. Evaluation of multi-satellite precipitation datasets and their error propagation in hydrological modeling in a Monsoon-Prone Region / J. Chen, Z. Li, L. Li, J. Wang, W. Qi, C.-Y. Xu, J.-S. Kim // Remote Sensing. – 2020. – V. 12 (21). – 3550. URL: <https://doi.org/10.3390/rs12213550> (дата обращения 01.12.2022).
20. Ресурсы поверхностных вод. Т. 15. Основные гидрологические характеристики. Алтай, Западная Сибирь и Северный Казахстан. Вып. 1. Верхняя и Средняя Обь / под ред. Е.П. Шурупа. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 542 с.
21. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. – Elsevier, 2019. – 840 с. URL: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03921-6> (дата обращения 01.12.2022).
22. Басилашвили Ц.З. Прогнозирование стока горных рек Грузии при редкой сети наблюдений // Метеорология и гидрология. – 2014. – № 6. – С. 61–66.
23. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Эффективность моделирования и прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2020. – № 1 (375). – С. 176–189. URL: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-176-189> (дата обращения 01.12.2022).
24. Борщ С.В., Христофоров А.В. Оценка качества прогнозов речного стока // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2015. – № 355. – С. 3–195.
25. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. – М.: Академия, 2010. – 300 с.
26. Representation of precipitation characteristics and extremes in regional reanalyses and satellite- and gauge-based estimates over Western and Central Europe / M. Lockhoff, O. Zolina, C. Simmer, J. Schulz // Journal of Hydrometeorology. – 2020. – V. 20 (6). – P. 1123–1145. URL: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0200.1> (дата обращения 01.12.2022).
27. Evaluating weather observations and the Climate Forecast System Reanalysis as inputs for hydrologic modelling in the tropics / D.A. Auerbach, Z.M. Easton, M.T. Walter, A.S. Flecker, D.R. Fuka // Hydrol. Process. – 2016. – V. 30 (19). – P. 3466–3477. URL: <https://doi.org/10.1002/hyp.10860> (дата обращения 01.12.2022).
28. System Reanalysis as weather input data for watershed models / D.R. Fuka, M.T. Walter, C. Macalister, A.T. Degaetano, T.S. Steenhuis, Z.M. Easton // Hydrological Processes. – 2014. – V. 28 (22). – P. 5613–5623. URL: <https://doi.org/10.1002/hyp.10073> (дата обращения 01.12.2022).
29. Mahto S.S., Mishra V. Does ERA-5 outperform other reanalysis products for hydrologic applications in India? // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2019. – V. 124 (16). – P. 9423–9441. URL: <https://doi.org/10.1029/2019JD031155> (дата обращения 01.12.2022).
30. Gampe D., Ludwig R. Evaluation of gridded precipitation data products for hydrological applications in complex topography // Hydrology. – 2017. – V. 4 (4). – 53. URL: <https://doi.org/10.3390/hydrology4040053> (дата обращения 01.12.2022).
31. Анализ региональных климатических процессов Сибири: подход, данные и некоторые результаты / Е.П. Гордов, В.Ю. Богомолов, Е.Ю. Генина, Т.М. Шульгина // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2011. – Т. 9 (1). – С. 56–66.
32. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России / В.Ю. Григорьев, Н.Л. Фролова, М.Б. Киреева, В.М. Степаненко // Известия РАН. Серия географическая. – 2022. – Т. 86 (3). – С. 435–446. URL: <https://doi.org/10.31857/S2587556622030062> (дата обращения 01.12.2022).
33. Voropay N.N., Ryazanova A.A., Dyukarev E.A. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia // Atmospheric Researches. – 1.06.2021. – V. 254. – 105528. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105528> (дата обращения 01.12.2022).
34. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford et al. // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2020. – V. 146. – P. 1999–2049. URL: <https://doi.org/10.3390/rs12213550> (дата обращения 01.12.2022).
35. ISIMIP2b simulation data from water (global) sector / S. Gosling, H. Müller Schmied, P. Burek et al. // GFZ Data Services. – 2020. URL: <https://dataservices.gfz-potsdam.de/pik/showshort.php?id=escidoc:5046893> (дата обращения 11.08.2022).
36. The CHRS data portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data / P. Nguyen, E. Shearer, H. Tran, M. Ombadi, N. Hayatbini, T. Palacios, P. Huynh, D. Braithwaite, G. Updegraff, K. Hsu, B. Kuligowski, W. Logan, S. Sorooshian // Scientific Data. – 2019. – Jan 8. – 6:180296. URL: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.296> (дата обращения 11.08.2022).
37. Сила связи. Сообщение 2. Градации величины корреляции / А.Н. Котеров, Л.Н. Ушенкова, Э.С. Зубенкова, М.В. Калинина, А.П. Бирюков, Е.М. Ласточкина, Д.В. Молодцова, А.А. Вайнсон // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2019. – Т. 64. – № 6. – С. 12–24. URL: <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2019-64-6-12-24> (дата обращения 11.08.2022).
38. Владимирова А.М. Факторы, определяющие возникновение экстремальных расходов и уровней воды половодья // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического ун-та. – 2009. – № 9. – С. 22–39.
39. Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. I. Обзор исследований / Н.А. Варенцова, М.Б. Киреева, М.А. Харламов М.И. Варенцов, Н.Л. Фролова, Е.С. Повалишников // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 2 (384). – С. 92–116. URL: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-92-116> (дата обращения 11.08.2022).

Поступила: 13.12.2022 г.

Прошла рецензирование: 27.02.2023 г.

#### Информация об авторах

**Самойлова С.Ю.**, кандидат географических наук, научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН.

**Ловцкая О.В.**, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН.

**Кудишин А.В.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН.

**Арнаут Д.В.**, преподаватель высшей категории Колледжа Алтайского Государственного Университета.

UDC556.161:556.166

## ANALYSIS OF FACTORS FOR FORMATION OF THE CHUMYSH RIVER MAXIMUM RUNOFF (WESTERN SIBERIA)

**Svetlana Yu. Samoilova<sup>1</sup>,**  
bastet05@list.ru

**Olga V. Lovtskaya<sup>1</sup>,**  
lov@iwep.ru

**Aleksey V. Kudishin<sup>1</sup>,**  
avkudishin@yandex.ru

**Darya V. Arnaut<sup>2</sup>,**  
arnautdv@mail.ru

<sup>1</sup> Institute for Water and Environmental Problems SB RAS,  
1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russia.

<sup>2</sup> College of Altai State University,  
61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russia.

**The relevance** of the study stems from the necessity to refine the methods of medium-term flood forecasts when sufficient hydrometeorological data are not available.

**The purpose** of the work is to assess probable application of spatially distributed precipitation models to forecast runoff volume of flood, to develop stochastic models for predicting flood volume and its maximum discharge using hydrometeorological observation data, distributed precipitation datasets from reanalysis and remote sensing data of high spatial and temporal resolution.

**Methods** include geoinformation, complex geographical and hydrometeorological analysis, statistical methods (correlation and regression analysis).

**Results.** The Chumysh basin moistening was estimated due to the data from spatially distributed precipitation models and hydrometeorological observation data; the relationship of total precipitation with runoff volume and maximum flood discharge was analyzed. A comparative evaluation of the obtained dependencies made it possible to identify key predictors for deriving the multiple linear regression equation. The statistical model was developed for predicting volumes and maximum discharges of Chumysh flood at Talmenka settlement using hydrometeorological observation data and reanalysis ones of high spatial and temporal resolution.

### Key words:

The Chumysh River, winter precipitation, flood, runoff depth, maximum discharge, statistical model of multiple regression.

The research was carried out within the State assignment IWEP SB RAS (project «Study of the mechanisms of natural and anthropogenic changes of quantity and quality of water resources in Siberia using hydrological models and information technologies»).

### REFERENCES

1. Puzanov A.V., Zinoviev A.T., Bezmaternykh D.M., Reznikov V.F., Troshkin D.N. Opasnye gidrologicheskie yavleniya v bassejne Verkhney Obi: sovremennye tendentsii i prognozirovaniye [Dangerous hydrological phenomena in the Upper Ob basin: Modern trends and forecasting]. *Water management of Russia: Problems, technologies, management*, 2018, no. 4, pp. 69–77.
2. Apollov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D. *Kurs gidrologicheskikh prognozov* [A course of hydrological forecasts]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 422 p.
3. Newman A.J., Stone A.G., Saharia M., Holman K.D., Addor N., Clark M.P. Identifying sensitivities in flood frequency analyses using a stochastic hydrologic modeling system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, vol. 25, pp. 5603–5621. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-25-5603-2021> (accessed 1 December 2022).
4. Pyankov S.V., Shikhov A.N. *Geoinformatsionnoe obespechenie modelirovaniya gidrologicheskikh protsessov i yavleniy* [Geoinformation support for modeling hydrological processes and phenomena]. Perm, PGNIU Publ., 2017. 148 c.
5. Romasko V.Y., Burakov D.A. Space monitoring of snow cover of river watersheds. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2017, vol. 10, no. 6, pp. 704–713. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-6-704-713> (accessed 1 December 2022).
6. Zhang Y., Hanati G., Danierhan S., Keke H. Application and assessment of a downscaled GPM dataset in the simulation of snowmelt runoff in alpine mountainous areas. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, vol. 41, 10110. Available at: <https://doi.org/10.17516/1999-494X-2017-10-6-704-713> (accessed 1 December 2022).
7. Weber M., Koch F., Bernhardt M., Schulz K. The evaluation of the potential of global data products for snow hydrological modelling in ungauged high-alpine catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, vol. 25, pp. 2869–2894. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-25-2869-2021> (accessed 1 December 2022).
8. Moreido V.M., Kalugin A.S. Assessing possible changes in Selenga R. water regime in the XXI century based on a runoff formation model. *Water Resources*, 2017, vol. 44, no. 3, pp. 390–398. Available at: <https://doi.org/10.7868/S0321059617030142> (accessed 1 December 2022).
9. Nasonova O.N., Guseva E.M., Kovalev B.E. Run-off Hydrograph reproduction of northern rivers with use of global data base. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2012, no. 5, pp. 61–70. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2012-5-61-70> (accessed 1 December 2022).
10. Ghebrehiwot A.A., Kozlov D.V. Assessment of applicability of mike 11-nam hydrological module for rainfall runoff modelling in a poorly studied river basin. *Vestnik MGSU*, 2020, vol. 15, no. 7, pp. 1030–1046. Available at: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.7.1030-1046> (accessed 1 December 2022).
11. Galakhov V.P., Samoylova S.Yu., Mardasova E.V. Assessment of the amount of winter precipitation in mountain basins and their in-



- fluence on flood formation (Charysh and Anuy river basins). *Earth's Cryosphere*, 2021, vol. 25, no. 6, pp. 51–62. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.15372/KZ20210605> (accessed 1 December 2022).
12. Mukhin V.M. Metodicheskie osnovy fiziko-statisticheskikh vidov kratkosrochnykh prognozov stoka gornykh rek [Methodological foundations of physico-statistical types of short-term forecasts of mountain river runoff]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii*, 2013, no. 349, pp. 5–46.
  13. Paromov V.V., Shumilova K.A., Gordeev I.N. Conditions of formation of high-water flood and flood forecast on the river Abakan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 11, pp. 57–67. In Rus.
  14. Burakov D.A., Petkun O.E., Gordeev I.N., Putintsev L.A., Ignatov A.V., Chekmarev A.A. Forecasting the water inflow into the Krasnoyarsk and Sayano-Shushenskoe reservoirs in the second quarter of the year. *Geography and Natural Resources*, 2016, vol. 37, no. 2, pp. 158–164.
  15. Burakov D.A., Kosmakova V.F., Volkovskaya N.P. Metody dolgосrochnogo prognoza maksimalnykh urovney vody na reke Irtysh i rezultaty ikh ispytaniya [Methods for long-term forecasting of maximum water levels on R. Irtysh and their testing results]. *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2019, no. 46, pp. 71–78.
  16. Margaryan V.G., Gaidukova E.V., Azizyan L.V., Khaustov V.A. O prognoze maksimalnykh raskhodov vesenego polovodya reki Arpa [On forecasting maximum discharge of spring flood on r. Arpa]. *Water management of Russia: problems, technologies, management*, 2022, no. 3, pp. 75–87. In Rus. Available at: [https://doi.org/10.35567/19994508\\_2022\\_3\\_6](https://doi.org/10.35567/19994508_2022_3_6) (accessed 1 December 2022).
  17. Varentsova N.A., Kireeva M.B., Frolova N.L., Kharlamov M.A., Ilich V.P., Sazonov A.A. Forecasting water inflow into the Tsimlyansk reservoir during spring flood under current climate conditions: problems and reproducibility. *Water Resources*, 2020, vol. 47, no. 6, pp. 953–967. Available at: <https://doi.org/10.1134/S0097807820060159> (accessed 1 December 2022).
  18. Kholmatov Sh.R., Sarafanov M.I. Prediction of the level of water in flood using data from the «NASA global land data assimilation system» on the Pechora River. *Colloquium-Journal*, 2019, no 17-1, pp. 29–32. In Rus. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovaniye-urovnya-vody-vo-vremya-polovodya-s-ispolzovaniem-dannyh-nasa-global-land-data-assimilation-system-na-primere-reki-pechora> (accessed: 13 September 2022).
  19. Chen J., Li Z., Li L., Wang J., Qi W., Xu C.-Y., Kim J.-S. Evaluation of multi-satellite precipitation datasets and their error propagation in hydrological modeling in a Monsoon-Prone Region. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 21, 3550. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs12213550> (accessed 1 December 2022).
  20. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 15. Osnovnye gidrologicheskie kharakteristiki. Altay, Zapadnaya Sibir i Severnyy Kazakhstan. Vyp. 1. Verkhnyaya i Srednyaya Ob* [Surface water resources. Vol. 15. Basic hydrological characteristics. Altai, Western Siberia and Northern Kazakhstan. Iss. 1. Upper and Middle Ob]. Ed. by E.P. Shurup. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 542 p.
  21. Wilks D.S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Elsevier, 2019. 840 p. Available at: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03921-6> (accessed 1 December 2022).
  22. Basilashvili C.Z. Prognozirovaniye stoka gornykh rek Gruzii pri redkoy seti nablyudeniy [Forecasting the runoff of mountain rivers in Georgia with a sparse network of observations]. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, no. 6, pp. 61–66.
  23. Borshch S.V., Khristoforov A.V. Otsenka kachestva prognozov rechnogo stoka [Assessment of the quality of river flow forecasts]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii*, 2015, no. 355, pp. 3–195.
  24. Borsch S.V., Simonov Y.A., Khristoforov A.V. Effektivnost modelirovaniya i prognozirovaniya rechnogo stoka [Efficiency of streamflow modeling and forecasting]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2020, no. 1 (375), pp. 176–189. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-1-176-189> (accessed 1 December 2022).
  25. Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. *Matematicheskoe modelirovaniye v gidrologii* [Mathematical modeling in hydrology]. Moscow, Akademiya Publ., 2010. 300 p.
  26. Lockhoff M., Zolina O., Simmer C., Schulz J. Representation of precipitation characteristics and extremes in regional reanalyses and satellite- and gauge-based estimates over Western and Central Europe. *Journal of Hydrometeorology*, 2020, vol. 20, no. 6, pp. 1123–1145. Available at: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0200.1> (accessed 1 December 2022).
  27. Auerbach D.A., Easton Z.M., Walter M.T., Flecker A.S., Fuka D.R. Evaluating weather observations and the Climate Forecast System Reanalysis as inputs for hydrologic modelling in the tropics. *Hydrological Processes*, 2016, vol. 30, no. 19, pp. 3466–3477. Available at: <https://doi.org/10.1002/hyp.10860> (accessed 1 December 2022).
  28. Fuka D.R., Walter M.T., Macalister C., Degaetano A.T., Steenhuis T.S., Easton T.S. Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*, 2014, vol. 28, no. 22, pp. 5613–5623. Available at: <https://doi.org/10.1002/hyp.10073> (accessed 1 December 2022).
  29. Mahto S.S., Mishra V. Does ERA-5 outperform other reanalysis products for hydrologic applications in India? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, vol. 124, no. 16, pp. 9423–9441. Available at: <https://doi.org/10.1029/2019jd031155> (accessed 1 December 2022).
  30. Gampe D., Ludwig R. Evaluation of gridded precipitation data products for hydrological applications in complex topography. *Hydrology*, 2017, vol. 4, no. 4:53. Available at: <https://doi.org/10.3390/hydrology4040053> (accessed 1 December 2022).
  31. Gordov E.P., Bogomolov V.Yu., Genina E.Yu., Shulgina T.M. Analysis of regional climate processes in Siberia: method, data and some results. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2011, vol. 9, no. 1, pp. 56–66. In Rus.
  32. Grigorev V.Yu., Frolova N.L., Kireeva M.B., Stepanenko V.M. Spatial and temporal variability of ERA5 precipitation accuracy over Russia. *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2022, vol. 86, no. 3, pp. 435–446. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.31857/S2587556622030062> (accessed 1 December 2022).
  33. Voropay N.N., Ryazanova A.A., Dyukarev E.A. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia. *Atmospheric Researches*, 2021, vol. 254, 105528. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105528> (accessed 1 December 2022).
  34. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, pp. 1999–2049. Available at: <https://doi.org/10.3390/rs12213550> (accessed 1 December 2022).
  35. Gosling S., Müller Schmied H., Burek P. ISIMIP2b simulation data from water (global) sector. *GFZ Data Services*, 2020. Available at: <https://dataservices.gfz-potsdam.de/pik/showshort.php?id=escidoc:5046893> (accessed 11 August 2022).
  36. Nguyen P., Shearer E., Tran H. The CHRS data portal, an easily accessible public repository for PERSIANN global satellite precipitation data. *Scientific Data*, 2019, 6:180296. Available at: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.296> (accessed 11 August 2022).
  37. Koterov A.N., Ushenkova L.N., Zubenkova E.S., Kalininna M.V., Biryukov A.P., Lastochkina E.M., Molodtsova D.V., Wainson A.A. Strength of association. Report 2. Graduation of correlation size. *Medical Radiology and Radiation Safety*, 2019, vol. 64, no. 6, pp. 12–24. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.12737/1024-6177-2019-64-6-12-24> (accessed 11 August 2022).
  38. Vladimirov A.M. Faktory, opredelyayushchie vozniknovenie ekstremalnykh raskhodov i urovney vody polovodya [Factors initiating occurrence of extreme flow rates and flood water levels]. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, 2009, no. 9, pp. 22–39. In Rus.
  39. Varentsova N.A., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Varentsov M.I., Frolova N.L., Povalishnikova E.S. Formirovaniye vesenego stoka rek ETR: osnovnye faktory i sposoby ikh ucheta. I. Obzor issledovaniy [Spring river runoff in the European part of Russia: main factors and their estimation. I. Review of previous studies]. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2022, no. 2 (384), pp. 92–116. Available at: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-92-116> (accessed 11 August 2022).

Reviewed: 13 December 2022.

Reviewed: 27 February 2023.



**Information about the authors**

*Svetlana Yu. Samoilova*, Cand. Sc., researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

*Olga V. Lovtskaya*, senior researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

*Aleksey V Kudishin*, Cand. Sc., senior researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

*Darya V. Arnaut*, lecturer, College of Altai State University.

УДК 553.411:549.324.31

## МИНЕРАЛОГИЯ РОССЫПНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА Р. ЗАСЛОНКА (ГОРНАЯ ШОРИЯ)

Пшеничкин Анатолий Яковлевич<sup>1</sup>,  
raya@tpu.ru

Гаврилов Роман Юрьевич<sup>1</sup>,  
GavrilovRY@tpu.ru

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

**Актуальность** работы вызвана необходимостью восполнения минерально-сырьевой базы золота на основе комплексной информации, полученной за последнее время с использованием современной аналитической базы.

**Цель:** изучение минералогического состава проб россыпного месторождения р. Заслонки (Горная Шория).

**Методы:** минералогические исследования, кристалломорфология, рентгеноспектральный анализ, сканирующая электронная микроскопия.

**Объект:** пробы шлихов россыпного месторождения золота реки Заслонки (Горная Шория).

**Результаты.** Проведено изучение минералогического состава, в том числе морфологии золотин, проб чёрных шлихов на бинокулярном микроскопе МБС-10 и стереомикроскопе OLYMPUS SZX10, и шлаков после плавки золота при получении сплава доре на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N. Сделаны микрофотографии разных типов золотин и других минералов. В результате исследований установлено, что подавляющее большинство золотин относятся к очень мелкому (68,71 %), а также к мелкому (14,69 %) и тонкому (12,47 %) классу крупности. Шлихи золота, после обогащения на флотационном столе, слаборадиоактивны за счёт, по-видимому, тонкой вкрапленности Th-U-содержащих минералов, что подтверждается изучением на электронном микроскопе шлаков после плавки золота при получении сплава доре, где установлены ураноторит, циркон и золото в виде зернистых сферул. Существует, по-видимому, три источника поступления золота в россыпь: 1) золото в «рубашке», покрытое тёмно-серыми, почти чёрными плотными плёнками, которое является более ранним золотом и имеющим, вероятно, более дальний источник сноса; 2) золото средней степени окатанности – уплощённое и комковидное золотисто-, тускло-жёлтого и серебристо-жёлтого цвета, источниками образования которого являлись среднетемпературные и средне удалённые кварцевые жилы района; 3) неокатанное золотисто-жёлтое золото, сформированное из близлежащих кварцевых слабо золотоносных жил. Бедный минералогический состав шлихов (и почти отсутствие окисленных минералов сульфидов, кроме пирита) говорит о наличии кварцевых малосульфидных среднетемпературных жил с низким содержанием мелкого золота в коренных рудах.

### Ключевые слова:

россыпное золото, минералогия, кристалломорфология, элементы-примеси, Горная Шория.

### Введение

Золотодобыча в Горной Шории, административно относящейся к южной части Кемеровской области [1–3] (рис. 1), ведётся с первой половины XIX в. как из россыпных [4, 5], так и из коренных [6–10] месторождений.

Изучением геологического строения и полезных ископаемых, в том числе золотоносности Горной Шории, в разное время занимались Л.В. Алабин, А.Я. Булытников, А.М. Зайцев, Ю.А. Калинин, Ф.П. Охотников, Н.А. Росляков, Н.В. Рослякова, Ю.А. Щербаков и др.

Первые находки золота на территории Кемеровской области датируются первой половиной XIX в., когда по рекам Фёдоровка и Ортон были открыты богатые россыпи золота и начались разработки россыпей в Горной Шории [11]. В последующие годы в разработку были вовлечены и коренные месторождения золота [6–13]. Однако в Горной Шории доля добытого рудного золота составляет около 1 %, а основной вклад в добычу золота приходится на россыпные месторождения. Это, с одной стороны, свидетельствует о потенциале региона по открытию новых коренных объектов золота, а с другой – об актуальности изучения россыпных месторождений – основного

разрабатываемого типа оруденения региона. Поэтому изучению россыпных месторождений уделяется большое внимание как в России, так и за рубежом [12–26].



Рис. 1. Схема расположения россыпного месторождения золота реки Заслонка

Fig. 1. Scheme of the location of the alluvial gold deposit of the Zaslonka river

В бассейне р. Заслонки, являющейся правым притоком р. Мрассу, разрабатывались россыпи как по самой реке, так и её притокам: Плоскому, Екатериновке, Пихтовке, Сухому Логу. За период эксплуатации с 1886 по 1953 гг. по этим россыпям добыто 906 кг золота при среднем содержании в них металла  $0,78 \text{ г/м}^3$  [11, 27, 28]. Сведений о минералогическом составе россыпи и о последующем периоде золотодобычи по р. Заслонке, в открытой печати, не известно. В этой связи полученные нами результаты исследований позволят дополнить представление о строении и минеральном составе россыпного месторождения Заслонка и дадут возможность прогнозировать коренные источники золота [29], а также по-новому подойти к технологии обогащения рудного пласта.

#### Геологическое строение участка работ

По результатам поисково-разведочных работ и других исследований [11] общая длина долины р. Заслонки достигает 30 км (рис. 1). Высота близлежащих гор не превышает 800 м. Местами долина реки заболочена. Россыпь залегает в контакте известняков и гранодиоритов. Известняки мраморизованы, графитизированы, иногда импрегнированы сульфидами, в основном пиритом.

Правобережные притоки р. Заслонки (Екатериновка, Плоская, Сухой Лог и др.), протекающие по известнякам, золотоносны, левобережные, проходящие по гранодиоритам, не золотоносны. Здесь слабо золотоносны лишь небольшие ключики, вероятно, за счет перемыва россыпей террас.

В нижнем течении р. Заслонки участок сложен красноцветными породами девона, в верхнем – эффузивно-сланцевой толщей кембрия.

Разрез рыхлых аллювиальных отложений россыпи представлен (сверху вниз): серыми глинами с редкой галькой и щебёнкой (1,3 м); слабо отсортированным галечником (до 15...20 см) с песками, прослойками глины, с дресвой и, нередко, с линзами и прослоями до 0,5...0,7 м синевато-зеленой очень вязкой глины (мощность слоя до 3 м и более). Пески (2...2,5 м) трудно промываемые и представлены 2 или 3 золотоносными горизонтами, мощностью 0,7...0,8 м, с прослоями грязно-серых глин.

Плотик имеет ровную поверхность и представлен выветрелыми гранодиоритами или мраморизованными известняками. Карманы, выступы и западения встречаются лишь на участках с мраморизованными известняками. Золото в россыпи очень мелкое и концентрируется в основном вблизи плотика и в западинах. Золото однородное, тонкопластинчатое, желтоватой окраски. Содержание золота колеблется в пределах  $0,25...11,85 \text{ г/м}^3$ , среднее –  $2,5 \text{ г/м}^3$ . Проба золота 907. За время эксплуатации россыпи самородки встречались редко.

#### Методика исследования

Проведено изучение минералогического состава чёрных шлихов [29] и шлаков после плавки золота при получении сплава доре.

Минералогический состав шлихов анализировался под бинокулярным микроскопом МБС-10 и стерео-

микроскопом OLYMPUS SZX10 с краткостью увеличения  $0,63\times-6,3\times$ , zoom 10,0:1. Полированные шлифы из шлаков изучались на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с энерго-дисперсионным спектрометром Bruker X@Flash 5010 для рентгено-спектрального анализа (оператор – доцент отделения геологии ТПУ С.С. Ильенко). Определение показателей преломления минералов производилось на поляризационном микроскопе OLYMPUS BX51.

#### Результаты исследования и их обсуждение

**Золото.** Как видно из таблицы, подавляющее большинство золотин относятся к очень мелкому золоту (68,71 %), а также к мелкому (14,69 %) и тонкому (12,47 %) классу. Это требует тщательного контроля опробования пульпы при работе промприбора, чтобы исключить потери тонкого золота при промывке.

**Таблица.** Крупность золота по данным минералогического анализа

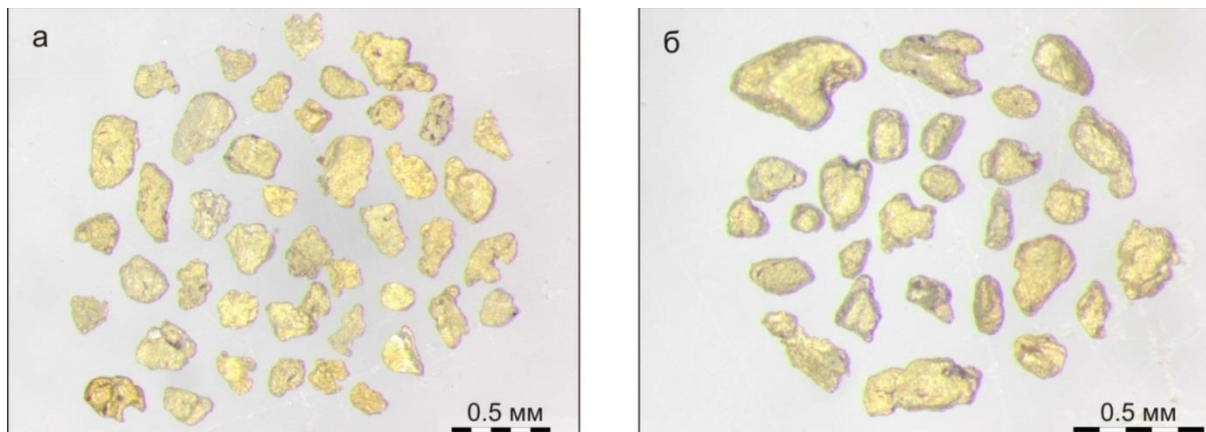
**Table.** Gold size according to mineralogical analysis

Класс крупности золота Gold grade	Размер золотин, мм Size of gold pieces, mm	Количество золотин Number of gold pieces	Содержание золота по классам крупности, % Gold content by grade, %
крупное/large	>2,0...4,0	8	0,80
среднее average	>1,0...2,0	29	2,92
мелкое/petty	>0,25...1,0	146	14,69
очень мелкое very small	>0,1...0,25	683	68,71
тонкое/thin	>0,05...0,1	124	12,47
тонкодисперсное finely dispersed	0,01...0,05	4	0,41
Сумма/Sum		994	100

В пробах преобладают золотины средней окатанности и в незначительном количестве неокатанные (рис. 2–5).

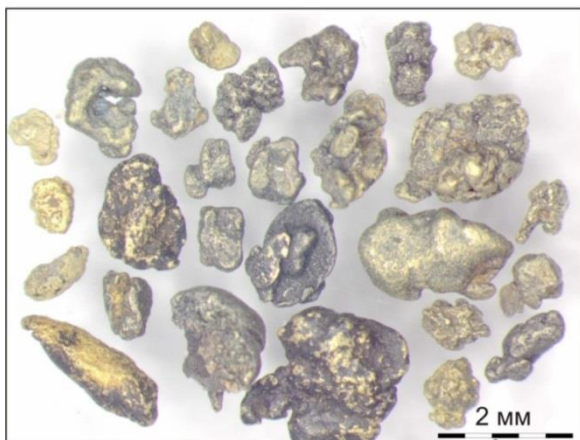
Среди окатанных золотин выделяется несколько разновидностей.

1. Золотины уплощенной, лепешковидной, таблитчатой и пластинчатой форм; очертания краев сглажены, у отдельных золотин края загнуты (рис. 2, а). Цвет золота золотисто-желтый, тускло-желтый, поверхность золотин шагреновая, у единичных в неровностях поверхности наблюдаются гидроокислы железа.
2. Плотные комковидные, угловато-комковидные золотины золотисто-, серебристо-желтого цвета, иногда покрытые небольшим количеством гидроокислов железа (рис. 2, б). Возможно, образованы за счет плохо огранённых кристалликов золота и их сростков. Встречаются единичные сростки комковидных и пластинчатых золотин.
3. Золото неправильного морфологического типа представлено плотными комковидными золотинами и их субпараллельными сростками, иногда слабо уплощенными, или интерстициальными, угловато-комковидными частицами. Цвет тускло-, серебристо-, золотисто-желтый (рис. 3).



**Рис. 2.** В различной степени уплощенные (а) и комковидные (б) золотины золотисто-жёлтого и серебристо-жёлтого цвета

**Fig. 2.** Flattened (a) and lumpy (b) golden-yellow and silvery-yellow gold pieces to varying degrees



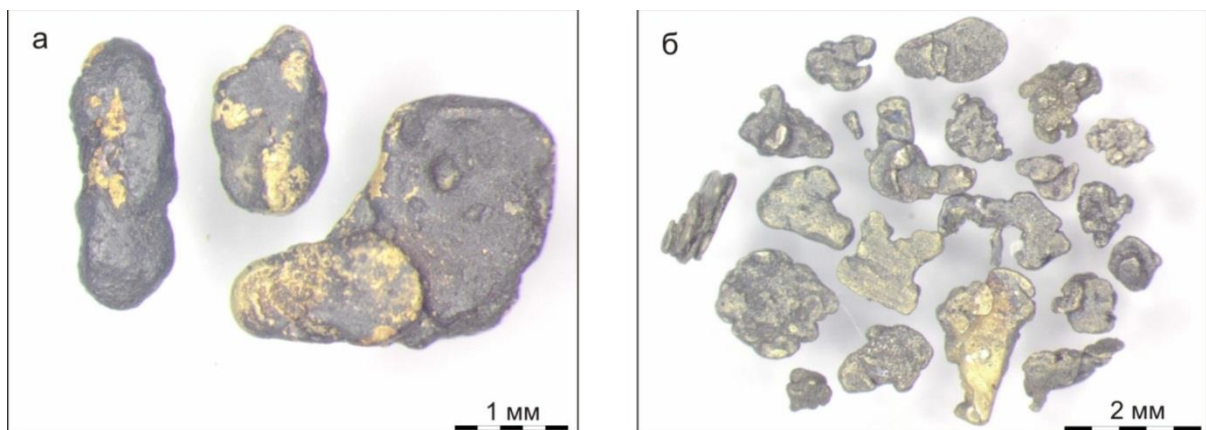
**Рис. 3.** Плотные комковидные золотины и их субпараллельные сростки

**Fig. 3.** Dense lumpy gold grains and their subparallel intergrowths

4. Крупные комковидные золотины и их сростки тускло-желтого, серебристо-желтого цвета, име-

ющие сглаженные очертания и шагреновую мелкобугристую поверхность (рис. 3).

5. Золото в «рубашке» (рис. 4). Форма золотин пластинчатая, таблитчатая и комковидная. Некоторые золотины представляют собой сростки двух и более таблитчатых частиц. Цвет золота тускло-желтый, серовато-желтый, золотисто-желтый, поверхность шагреновая, на поверхности присутствует налёт – корочка плотного тёмно-серого до черного цвета, предположительно, гидроокислов железа или марганца. А по данным Л.К. Яхонтовой и А.П. Груднёва [30] «рубашка» золотин – это селеносодержащий (1...2 % селена) гипергенный сульфид золота – петровскит  $\text{Au}(\text{Se})\text{S}_2$ . Минерал образует тончайшие микроскопические плотные плёнки на поверхности золотин в экзогенных условиях. Его окраска тёмно-серая до чёрной, блеск металлический. Характерна высокая хрупкость минерала. Образование петровскита свидетельствует о важной роли тиосульфидных компонентов золота и серебра в растворах зоны гипергенеза.



**Рис. 4.** Золото в «рубашке» (а, б): уплощённые окатанные золотины, покрытые корочкой тёмно-серого цвета – петровскит (?)

**Fig. 4.** Gold in a «jacket» (a, б): flattened rounded gold pieces covered with a dark gray crust – petrovskite (?)



Золото неокатанное или слабо окатанное золоти-сто-жёлтого цвета, размером от 0,1 до 1...1,5 мм, встречается редко (рис. 5).

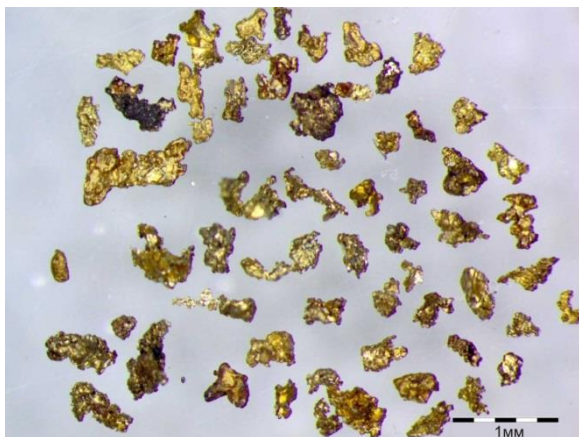


Рис. 5. Золото неокатанное золоти-сто-жёлтого цвета  
 Fig. 5. Golden yellow not rounded gold

Форма золотинок разнообразна и является следствием отпечатков минералов (в основном кварца) или заполнения интерстиций между минералами и представлена в виде неправильной формы выделений с зазубренными, крючковидными краями, дендритовидными, палочковидными, комковидными, в единичных случаях встречаются кристаллоподобные образования, близкие к кубам. Иногда встречаются золотишки в сростках с кварцем или галенитом. Нередко золотишки покрыты окислами железа. Неокатан-

ность золотинок говорит о близости источника сноса золота.

Методом ИСП-масс-спектрометрии была проанализирована пульпа с промприбора, где выявлены следующие элементы (в мг/т): Pt (10), Pd (23), Au (2,2), Ag (38), а также Th (4,76 г/т) и U (1,76 г/т).

Кроме того, установлено, что обогащённый шлик золота после флотационного стола слабо радиоактивен, в связи с чем дополнительно проведено изучение шлака после плавки обогащённого шлика россыпного золота. Изучение полированных шлифов шлака производилось в Центре «Урановая геология» ТПУ на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N (аналитик С.С. Ильенко). В результате проведённых исследований установлено: в шлаках постоянно встречается золото в виде зернистых сферул размером до 100...600 мкм (рис. 6) или реже – в виде натёчных агрегатов; почти во всех выявленных частицах золота обнаруживается серебро (6...15 %), которое распределяется по частице неравномерно. Иногда встречается диоксид свинца, заполняющий пространство между зёрнами золота. Золотые сферулы оконтуриваются или лёллингитом, или оксидом железа, или сложной фазой Pb-Sn-W-Th-U-Zr-Ti-O. Из других минералов в шлаках установлены циркон, рутил, бадделеит, ураноторит (рис. 7), шеелит, альбит, кварц. При переплавке шлаков в них золото не обнаружено.

Минералогическим анализом в шликах выявлены галенит, ильменит, магнетит, касситерит, циркон, кварц, карбонаты и другие породообразующие минералы (рис. 8).

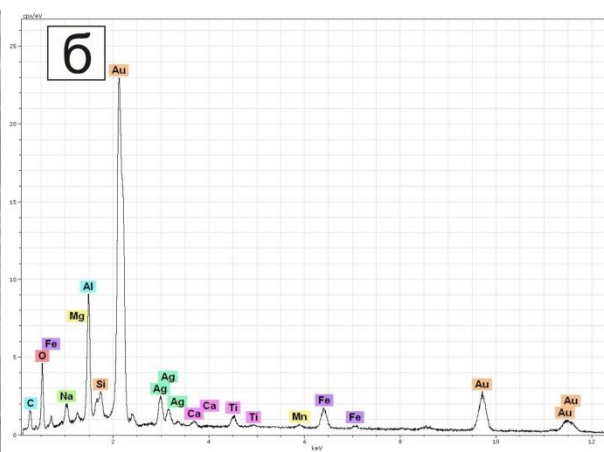
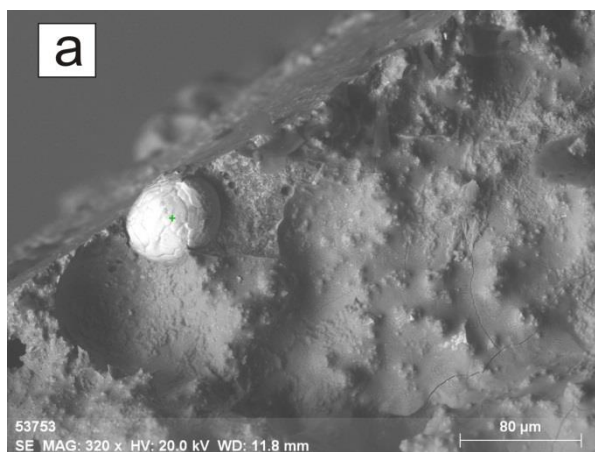


Рис. 6. Снимок в обратно-рассеянных электронах (а) и энерго-дисперсионный спектр (б) сферул золота в шлаке после плавки обогащённого на флотостоле шлика

Fig. 6. Back-scattered electron image (a) and energy-dispersive spectrum (b) of gold spherules in slag after melting concentrate enriched on the flotation table

Галенит в незначительных количествах присутствует в виде кубических обломков-выколов по спайности размером 0,2...2,2 мм свинцово-серого цвета. Зёрна неокатаны, хорошо видна спайность по кубу (100) (рис. 8, а).

Псевдоморфозы лимонита по пириту встречаются довольно часто в виде хорошо образованных кубических кристаллов или в комбинации куба и средней развитости грани пентагондодекаэдра – (100)+(210)

размером 0,5...2,0 мм тёмно-бурого до чёрного цвета (рис. 8, б). Ребра кристаллов четкие, не сглажены. Грани (100) ровные, и на них не обнаружена взаимно перпендикулярная комбинационная или послонная штриховка роста. Нередко в изломе кристаллов наблюдается не окисленный пирит.

Ильменит встречается в виде единичных обломков и кристаллов таблитчатой формы черного цвета, размер зерен 0,1...2,2 мм. Слабо магнитен.

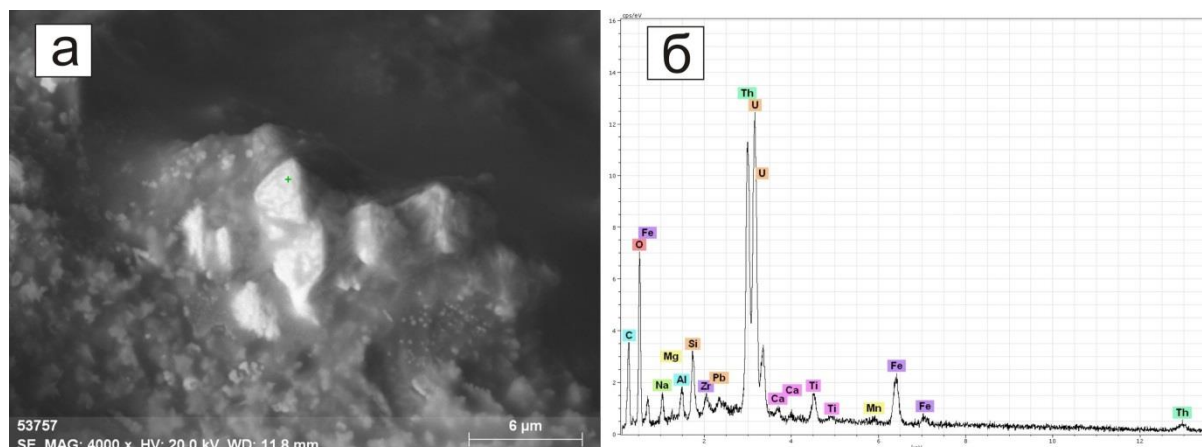


Рис. 7. Снимок в обратно-рассеянных электронах (а) и энерго-дисперсионный спектр (б) U-Th-содержащего минерала (ураноторит?) в шлаке после плавки обогащённого на флотостоле шлиха золота

Fig. 7. Back-scattered electron image (a) and energy-dispersive spectrum (b) of a U-Th-bearing mineral (uranothorite?) in slag after melting gold concentrate enriched on the flotation table

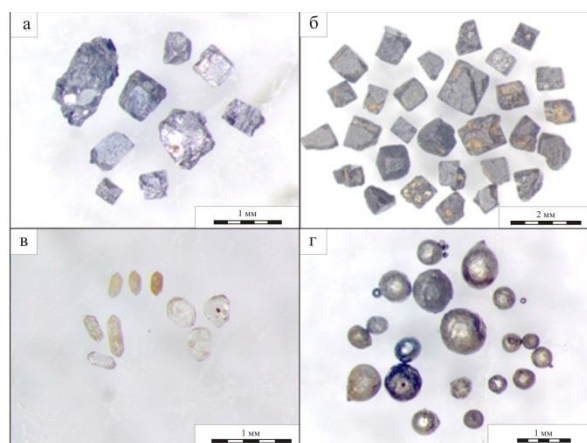


Рис. 8. Минералы шлихов россыпи реки Заслонки: галенит (а), псевдоморфозы лимонита по пириту (б), циркон (в), магнитные шарики (г)

Fig. 8. Minerals of schlichs of the Zaslonka river placer: galena (a), pseudomorphs of limonite after pyrite (б), zircon (в), magnetic balls (г)

Магнетит установлен в значительном количестве и представлен в виде зёрен, обломков кристаллов средней окатанности размером 0,1...1,5 мм. Цвет минерала черный, блеск металлический, слабо матовый за счёт незначительного окисления, сильно магнитный. Нередко встречаются хорошо образованные кристаллы в форме октаэдров (111). Иногда на октаэдрических кристаллах встречается слабо развитая грань ромбододекаэдра (110) – (111)+(110).

Касситерит встречается в виде окатанных зерен и обломков призматических, короткопризматических кристаллов, где диагностируются грани призмы (100) и пирамиды (111). Размер зерен 0,5...2,5 мм. Цвет минерала бледно-желтый, красно-бурый, бурый, серый с сильным алмазным блеском, в тонких осколках в проходящем свете наблюдаются высокие цвета интерференции.

Циркон присутствует в довольно большом количестве в виде хорошо образованных призматических бесцветных и бледно-желтых кристаллов, иногда с

мелкими чёрными включениями других минералов (рис. 8, в). При наличии включений магнетита проявляет магнитные свойства. Кристаллы образованы хорошо развитыми гранями тетрагональных призм (100) и (110) и тетрагональной дипирамиды (111). Размер кристаллов 0,1...0,25 мм, коэффициент удлинения (Ку) равен 1,5...2,0.

Из других минералов постоянно присутствует кварц в виде слабо окатанных обломков молочно-белого цвета, роговая обманка и актинолит в виде окатанных зерен буровато-слабо зеленоватого и тёмно-зелёного цвета; единичные зёрна светло-коричневого граната (андрадит), фисташковые средней окатанности зёрна эпидота, серовато-серые таблички со спайностью и перламутровым блеском мусковита, светло-коричневые обломки кристалликов с алмазным блеском сфена.

Часто в пробах отмечаются шаровидные образования размером до 0,25 мм трёх видов: карбонатные (вскипают с HCl) шарики серого цвета, шероховатые с очень мелкой вкрапленностью тёмного минерала; сульфидные (пиритовые?) шарики тёмно-серого, слабо латунно-желтого цвета и единичные шарики металлического, серого цвета, блестящие, не окисленные (рис. 8, г) (платина или шарики метеоритного происхождения).

## Выводы

1. Существует, по-видимому, три источника поступления золота в россыпь:

- золото в «рубашке», покрытое тёмно-серыми, почти чёрными плотными плёнками (возможно, гипергенного сульфида золота петровскита  $\text{Au}(\text{Se})\text{S}_2$ ), является более ранним золотом, имеющим, вероятно, более дальний источник сноса;
- золото средней степени окатанности, уплощённое и комковидное золотисто-, тускло-жёлтого и серебристо-жёлтого цвета, источниками образования которого являлись средне-температурные и среднеудалённые кварцевые жилы района;

- неокатанное золотисто-жёлтого цвета золото сформировалось из близлежащих кварцевых слабо золотоносных жил. Об этом свидетельствует наличие неокатанных и не окисленных зёрен галенита.
  - 2. Подавляющее большинство золотин относятся к очень мелкому (68,71 %), а также к мелкому (14,69 %) и тонкому (12,47 %) классу крупности. Это требует тщательного контроля опробования пульпы при работе промприбора, чтобы исключить потери тонкого золота при промывке.
  - 3. Шлихи золота после обогащения на флотационном столе слабо радиоактивны за счёт, по видимому, тонкой вкрапленности Th-U-содержащих минералов, что подтверждается изучением на электронном микроскопе шлаков после плавки золота при получении сплава доре. В шлаках установлены: ураноторит, циркон и золото в виде зернистых сферул размером до 100...600 мкм. При повторной плавке шлаков золото в них не обнаружено.
  - 4. Бедный минералогический состав шлихов (и почти отсутствие окисленных минералов сульфидов, кроме пирита) говорит о наличии кварцевых малосульфидных среднетемпературных жил с низким содержанием мелкого золота в коренных рудах.
  - 5. При дальнейших исследованиях в районе россыпи реки Заслонки необходимо установить генезис повышенного содержания палладия (23 мг/т), платины (10 мг/т), тория (4,76 г/т) и урана (1,76 г/т), выявленных при опробовании пульпы с промприбора и в шлаках после плавки шлиха золота.
- СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**
1. Иванов А.И., Черных А.И., Вартанян С.С. Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы золота в Российской Федерации // Смирновский сборник. – 2018. – С. 10–29.
  2. Черных А.И., Иванов А.И., Алексеев Я.В. Развитие минерально-сырьевой базы золота субъектов Российской Федерации в 2005–2018 гг. // Отечественная геология. – 2020. – № 1. – С. 21–28.
  3. Благородные металлы Российской Федерации – состояние минерально-сырьевой базы и перспективы её развития / А.И. Иванов, Я.В. Алексеев, А.И. Черных, Е.А. Наумов, Д.А. Куликов, А.С. Тарасов, О.М. Конкина, К.М. Минькин, И.В. Попов // Отечественная геология. – 2022. – № 1. – С. 3–25.
  4. Сараев В.А. Закономерности размещения и некоторые особенности состава золотоносных россыпей Горной Шории // Известия Томского политехнического института. – 1968. – Т. 134. – С. 172–178.
  5. Сыроватский В.В. Состав и элементы примеси самородного золота Ортоно-Федоровской рудной зоны // Магматизм, литология и вопросы рудоносности Сибири / под ред. В.Г. Корель. – Новосибирск: Наука, 1974. – С. 122–127.
  6. Новые данные об источниках питания золотоносной россыпи р. Федоровка (Горная Шория) / В.В. Колпаков, П.А. Неволько, В.Ф. Дульцев, П.А. Фоминых // Разведка и охрана недр. – 2016. – № 4. – С. 12–17.
  7. Столбова Н.Ф. Рудная минерализация Лебедской скарновой зоны // Известия Томского политехнического института. – 1971. – Т. 217. – С. 178–183.
  8. Гусев А.И. Металлогения золота Горного Алтая и южной части Горной Шории. – Томск: Изд-во STT, 2003. – 350 с.
  9. Щербаков Ю.Г. Геохимия золоторудных месторождений в Кузнецком Алатау и Горном Алтае. – Новосибирск: Наука, 1974. – 278 с.
  10. Щербаков Ю.Г., Рослякова Н.В., Колпаков В.В. Федоровское месторождение золота и перспективы золотоносности Южно-Сибирской рудной провинции (Горная Шория) // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44. – № 10. – С. 979–992.
  11. Алабин Л.В., Калинин Ю.А. Металлогения золота Кузнецкого Алатау. – Новосибирск: СО РАН, НИЦ ОИГТМ, 1999. – 237 с.
  12. Условия формирования золото-кварцевого оруденения Ортоно-Федоровского рудно-россыпного узла (Горная Шория) / В.В. Колпаков, П.А. Неволько, Ю.А. Калинин, М.В. Кириллов, А.А. Шадрин, Ю.О. Редин, В.Ф. Дульцев // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2015. – № 1 (21). – С. 103–115.
  13. Особенности орогенного золото-кварцевого оруденения Федоровского рудно-россыпного поля (Горная Шория) на примере Лазаретного и Федоровского рудопроявлений / В.В. Колпаков, П.А. Неволько, А.А. Редина, Ю.О. Редин // Геосферные исследования. – 2022. – № 2. – С. 23–46.
  14. Hallbauer D.K., Utter T. Geochemical and morphological characteristics of gold particles from recent river deposits and the fossil placers of the Witwatersrand // Mineral Deposita. – 1977. – V. 12 (3) – P. 293–306.
  15. Youngson J.H., Craw D. Variation in placer style, gold morphology, and gold particle behavior down gravel bed-load rivers: an example from the Shotover/Arrow-Kawarau-Clutha River system, Otago, New Zealand // Economic Geology. – 1999. – V. 94. – № 5. – P. 615–634.
  16. Stefanova V., Veselin K., Goritza S. Morphology and chemistry of gold of the Borov Dol ore occurrence, the Buchim region, Republic of Macedonia // Rev Bulgar Geol Soc. – 2004. – V. 65 (1–3). – P. 125–132.
  17. Morphology and chemistry of placer gold from Attappadi Valley, Southern India / M. Nakagawa, M. Santosh, C.G. Nambiar, C. Matsubara // Gondwana Research. – 2005. – V. 8. – № 2. – P. 213–222.
  18. Chapman R.J., Mortensen J.K. Application of microchemical characterization of placer gold grains to exploration for epithermal gold mineralization in regions of poor exposure // Journal of Geochemical Exploration. – 2006. – V. 91 (1–3). – P. 1–26.
  19. Геохимические особенности самородного золота месторождений различных рудно-формационных типов / Л.А. Николаева, А.Н. Некрасова, С.А. Миляев, С.В. Яблокова, А.М. Гаврилов // Геология рудных месторождений. – 2013. – Т. 55. – № 3. – С. 203–213.
  20. Geophysical survey of deep alluvial gold in terms of bolotisty deposit / I.Yu. Rasskazov, N.G. Shkabarnya, V.S. Litvinsev, G.N. Shkabarnya // Eurasian Mining. – 2017. – V. 2. – P. 3–7.
  21. Geostatistical and GIS analysis of the spatial variability of alluvial gold content in Ngoura-Colomines area, Eastern Cameroon: implications for the exploration of primary gold deposit / J.D. Takodjou Wambo, S. Ganno, Y.S. Djonthu Lahe, G.D. Kouankap Nono, D.H. Fossi, M.S. Tchouatcha, J.P. Nzenti // Journal of African Earth Sciences. – 2018. – V. 142. – P. 138–157.
  22. Small-scale surface mining of gold placers: Detection, mapping, and temporal analysis through the use of free satellite imagery / E. Ibrahim, L. Lema, P. Barnabé, P. Lacroix, E. Pirard // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2020. – V. 93. – 102194.
  23. Characterisation of alluvial gold exploration data to improve gold recovery in Ghana / G. Foli, K. Agyemang, B.A. Brako, S.K.Y. Gawu, P.M. Nude // Arabian Journal of Geosciences. – 2020. – V. 13. – № 20. – 1105.
  24. Exploration methodology using morphology and alloy composition of alluvial gold: a case study from Quaternary deposits of the Nowshera District, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan / L. Ali, R. Chapman, M. Farhan, M.T. Shah, S.A. Khattak, A. Ali // Mining, Metallurgy and Exploration. – 2021. – V. 38. – № 1. – P. 367–377.
  25. Nikiforova Z. Criteria for determining the genesis of placers and their different sources based on the morphological features of placer gold // Minerals. – 2021. – V. 4. – P. 1–23.



26. Morphology and composition of alluvial gold from the Meiganga area, northern Cameroon: implications for provenance / E.G.T. Ngouabe, A. Vishiti, M.T. Nforba, R. Rossouw, J. Etame, C.E. Suh // J. Sediment. Environ. – 2022. – V. 7. – P. 671–689.
27. Перспективы коренной золотоносности юга Сибирской платформы по результатам изучения морфо-геохимических особенностей шлихового золота / И.В. Четвертаков, А.В. Иванов, Е.А. Михеева, Т.А. Чикишева, Т.Ю. Якич // Отечественная геология. – 2021. – № 1. – С. 97–114.
28. Шадрин С.В. Геохимические индикаторы золотого оруденения Ортон-Фёдоровского рудного узла (Горная Шория): автореферат дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2000. – 23 с.
29. Пшеничкин А.Я. Кристалломорфология пирита и её использование в практике поисково-разведочных работ на золото // Геология и геофизика. – 1989. – № 11. – С. 65–75.
30. Яхонтова Л.К., Груднев А.П. Минералогия окисленных руд. Справочное пособие. – М.: Недра, 1987. – С. 96–97.

Дата поступления: 02.05.2023 г.

Дата рецензирования: 04.05.2023 г.

#### Информация об авторах

**Пшеничкин А.Я.**, кандидат геолого-минералогических наук, инженер отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Гаврилов Р.Ю.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 553.411:549.324.31

## MINERALOGY OF THE ALLOWER GOLD DEPOSIT OF THE RIVER ZASLONKA (GORNAYA SHORIA)

Anatoliy Ya. Pshenichkin<sup>1</sup>,  
paya@tpu.ru

Roman Yu. Gavrilov<sup>1</sup>,  
GavrilovRY@tpu.ru

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

**The relevance** of the work is caused by the need to replenish the mineral resource base of gold on the basis of comprehensive information obtained recently using a modern analytical base.

**Purpose:** to study the mineralogical composition of samples of the placer deposit of the river Zaslanka (Gornaya Shoria).

**Methods:** mineralogical studies, crystal morphology, X-ray spectral analysis, scanning electron microscopy.

**Object:** samples of concentrates from the alluvial gold deposit of the Zaslanka river (Gornaya Shoria).

**Results.** The authors carried out the study of the mineralogical composition, including the morphology of gold particles, samples of black concentrates on the MBS-10 binocular microscope and OLYMPUS SZX10 stereomicroscope, and slags after gold melting during the preparation of doré alloy on a Hitachi S-3400N scanning electron microscope. Photomicrographs of various types of gold particles and other minerals were taken. As a result of the research, it was found that the vast majority of gold particles belong to very small (68,71 %), as well as to small (14,69 %) and thin (12,47 %) size classes. Gold concentrates, after enrichment on a flotation table, are weakly radioactive due, apparently, to a thin dissemination of Th-U-containing minerals, which is confirmed by the study of slags on an electron microscope after melting gold during the production of doré alloy, where uranohorite, zircon and gold are found in the form of granular spherules. There are, apparently, three sources of gold entering the placer: 1) gold in the «shirt», covered with dark gray, almost black dense films, which is older gold and probably has a more distant source of drift; 2) gold of medium degree of roundness – flattened and lumpy golden-, dull-yellow and silvery-yellow in color, the sources of formation of which were medium-temperature and medium-distant quartz veins of the area; 3) unrounded golden-yellow gold, formed from nearby quartz weakly gold-bearing veins. The poor mineralogical composition of concentrates (and the almost absence of oxidized sulfide minerals, except for pyrite) indicates the presence of low-sulfide medium-temperature quartz veins with a low content of fine gold in primary ores.

### Key words:

alluvial gold, mineralogy, crystal morphology, impurity elements, Gornaya Shoria.

### REFERENCES

- Ivanov A.I., Chernykh A.I., Vartanyan S.S. Sostoyanie i perspektivy razvitiya mineralno-syr'evoy bazy zolota v Rossiyskoy Federatsii [Status and prospects for the development of the mineral resource base of gold in the Russian Federation]. *Smirnovsky collection*, 2018, pp. 10–29.
- Chernykh A.I., Ivanov A.I., Alekseev Ya.V. Development of the mineral resource base of gold in the constituent entities of the Russian Federation in 2005–2018. *Otechestvennaya geologiya*, 2020, no. 1, pp. 21–28. In Rus.
- Ivanov A.I., Alekseev Ya.V., Chernykh A.I., Naumov E.A., Kulikov D.A., Tarasov A.S., Konkina O.M., Minkin K.M., Popov I.V. Precious metals of the Russian Federation – the state of the mineral resource base and the prospects for its development. *Otechestvennaya geologiya*, 2022, no. 1, pp. 3–25. In Rus.
- Saraev V.A. Patterns of placement and some features of the composition of gold-bearing placers of Gornaya Shoriya. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1968, vol. 134, pp. 172–178. In Rus.
- Syrovatskiy V.V. Sostav i elementy primesi samorodnogo zolota Ortono-Fedorovskoy rudnoy zony [Composition and impurity elements of native gold of the Ortono-Fedorovskaya ore zone]. *Magmatizm, litologiya i voprosy rudonosnosti Sibiri* [Magmatism, lithology and problems of ore potential in Siberia]. Ed. by V.G. Corel. Novosibirsk, Nauka Publ., 1974, pp. 122–127.
- Kolpakov V.V., Nevolko P.A., Dultsev V.F., Fominykh P.A. New data on the sources of nutrition of the gold-bearing placer of the river. Fedorovka (Gornaya Shoria). *Exploring and protection resources*, 2016, no. 4, pp. 12–17. In Rus.
- Stolbova N.F. Ore mineralization of the Lebedskaya skarn zone. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute*, 1971, vol. 217, pp. 178–183. In Rus.
- Gusev A.I. *Metallogeniya zolota Gornogo Altaya i yuzhnoy chasti Gornoy Shorii* [Metallogeny of gold in Gorny Altai and the southern part of Gornaya Shoria]. Tomsk, STT Publ., 2003. 350 p.
- Shcherbakov Yu.G. *Geokhimiya zolotorudnykh mestorozhdeniy v Kuznetskom Alatau i Gornom Altaye* [Geochemistry of gold deposits in Kuznetsk Alatau and Gorny Altai]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1974. 278 p.
- Shcherbakov Yu.G., Roslyakova N.V., Kolpakov V.V. Fedorovskoye gold deposit and gold-bearing potential of the South-Siberian ore province (Mountain Shoria). *Russian Geology and Geophysics*, 2003, no. 44 (3), pp. 939–953.
- Alabin L.V., Kalinin Yu.A. *Metallogeniya zolota Kuznetskogo Alatau* [Metallogeny of gold in the Kuznetsk Alatau]. Novosibirsk, SO RAN, NITs OIGGM Publ., 1999. 237 p.
- Kolpakov V.V., Nevolko P.A., Kalinin Yu.A., Kirillov M.V., Shadrina A.A., Redin Yu.O., Dultsev V.F. Conditions for the formation of gold-quartz mineralization of the Orton-Fedorovsky ore-placer cluster (Gornaya Shoria). *Geology and Mineral Resources of Siberia*, 2015, no. 1 (21), pp. 103–115. In Rus.
- Kolpakov V.V., Nevolko P.A., Redina A.A., Redin Yu.O. Features of orogenic gold-quartz mineralization of the Fedorovsky ore-placer field (Gornaya Shoria) on the example of the Lazaretnoe and Fedorovsky ore occurrences. *Geospheric Research*, 2022, no. 2, pp. 23–46. In Rus.
- Hallbauer D.K., Utter T. Geochemical and morphological characteristics of gold particles from recent river deposits and the fossil placers of the Witwatersrand. *Mineral Deposita*, 1977, vol. 12 (3), pp. 293–306.
- Youngson J.H., Craw D. Variation in placer style, gold morphology, and gold particle behavior down gravel bed-load rivers: an example from the Shotover/Arrow-Kawarau-Clutha River system, Otago, New Zealand. *Economic Geology*, 1999, vol. 94, no. 5, pp. 615–634.

16. Stefanova V., Veselin K., Goritz S. Morphology and chemistry of gold of the Borov Dol ore occurrence, the Buchim region, Republic of Macedonia. *Rev Bulgar Geol Soc*, 2004. vol. 65 (1–3), pp. 125–132.
17. Nakagawa M., Santosh M., Nambiar C.G., Matsubara C. Morphology and chemistry of placer gold from Attappadi Valley, Southern India. *Gondwana Research*, 2005, vol. 8, no. 2, pp. 213–222.
18. Chapman R.J., Mortensen J.K. Application of microchemical characterization of placer gold grains to exploration for epithermal gold mineralization in regions of poor exposure. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, vol. 91 (1–3), pp. 1–26.
19. Nikolaeva L.A., Nekrasova A.N., Milyaev S.A., Yablokova S.V., Gavrilov A.M. Geochemistry of native gold from Deposits of various types. *Geology of Ore Deposits*, 2013, no. 55 (3), pp. 176–184.
20. Rasskazov I.Yu., Shkabarnya N.G., Litvintsev V.S., Shkabarnya G.N. Geophysical survey of deep alluvial gold in terms of bolotisty deposit. *Eurasian Mining*, 2017, vol. 2, pp. 3–7.
21. Takodjou Wambo J.D., Ganno S., Djonthu Lahe Y.S., Kouankap Nono G.D., Fossi D.H., Tchouatcha M.S., Nzenti J.P. Geostatistical and GIS analysis of the spatial variability of alluvial gold content in Ngoura-Colomines area, Eastern Cameroon: implications for the exploration of primary gold deposit. *Journal of African Earth Sciences*, 2018, vol. 142, pp. 138–157.
22. Ibrahim E., Lema L., Barnabé P., Lacroix P., Pirard E. Small-scale surface mining of gold placers: Detection, mapping, and temporal analysis through the use of free satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2020, vol. 93, 102194.
23. Foli G., Agyemang K., Brako B.A., Gawu S.K.Y., Nude P.M. Characterisation of alluvial gold exploration data to improve gold recovery in Ghana. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, vol. 13, no. 20, 1105.
24. Ali L., Chapman R., Farhan M., Shah M.T., Khattak S.A., Ali A. Exploration methodology using morphology and alloy composition of alluvial gold: a case study from Quaternary Deposits of the Nowshera District, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 2021, vol. 38, no. 1, pp. 367–377.
25. Nikiforova Z. Criteria for determining the genesis of placers and their different sources based on the morphological features of placer gold. *Minerals*, 2021, vol. 4, pp. 1–23.
26. Ngouabe E.G.T., Vishiti A., Nforba M.T. Morphology and composition of alluvial gold from the Meiganga area, northern Cameroon: implications for provenance. *J. Sediment. Environ*, 2022, vol. 7, pp. 671–689.
27. Chetvertakov I.V., Ivanov A.V., Mikheeva E.A., Chikisheva T.A., Yakich T.Yu. Prospects for the primary gold content of the south of the Siberian Platform based on the results of studying the morphological and geochemical features of slip gold. *Otechstvennaya geologiya*, 2021, no. 1, pp. 97–114. In Rus.
28. Shadrina S.V. *Geokhimicheskie indikatory zolotogo orudneniya Orton-Fedorovskogo rudnogo uzla (Gornaya Shoriya)*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Geochemical indicators of gold mineralization of the Orton-Fyodorovsky ore cluster (Gornaya Shoria). Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2000. 23 p.
29. Pshenichkin A.Ya. Kristallomorfologiya pirita i ee ispolzovanie v praktike poiskovo-razvedochnykh rabot na zoloto [Crystal morphology of pyrite and its use in the practice of prospecting for gold]. *Russian Geology and Geophysics*, 1989, vol. 30, no. 11, pp. 65–75.
30. Yakhontova L.K., Grudnev A.P. *Mineralogiya okislennykh rud. Spravochnoe posobie* [Mineralogy of oxidized ores. Reference manual]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 198 p.

Received: 2 May 2023.

Reviewed: 4 May 2023.

#### Information about the authors

**Anatoliy Ya. Pshenichkin**, Cand. Sc., engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Roman Yu. Gavrilov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.276

## ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ СКВАЖИНАМИ

Сальникова Ольга Леонидовна<sup>1</sup>,  
olga\_saln@mail.ru

Черных Ирина Александровна<sup>2</sup>,  
Irina.Chernykh@lp.lukoil.com

Мартюшев Дмитрий Александрович<sup>2</sup>,  
martyushevdi@inbox.ru

Пономарева Инна Николаевна<sup>2</sup>,  
permpolitech@gmail.com

<sup>1</sup> ПАО «Пермнефтегеофизика»,  
Россия, 614090, г. Пермь, ул. Лодыгина, 34.

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29.

**Актуальность** работы обусловлена тем, что в условиях непрерывного ухудшения структуры запасов углеводородного сырья реализуются различные технологии их разработки, основанные, в том числе, на применении скважин сложной конструкции (горизонтальные скважины). Увеличение доли горизонтальных скважин в общем эксплуатационном фонде обуславливает актуальность научно-методологического обоснования технологий проведения исследований, комплексно учитывающих особенности строения коллектора и геометрию течения флюида. Наиболее полный объем геолого-промысловой информации может быть получен при комплексировании двух основных видов исследований – геофизических и гидродинамических. Проблематикой данных, по сути, косвенных методов исследований следует считать необходимость оценки достоверности их результатов и отсутствие подходов к снижению неопределенностей интерпретации, что особо актуально в условиях невозможности отбора керна в горизонтальных скважинах. В настоящей статье предложены возможные направления решения указанных проблем.

**Цель:** научное обоснование подходов к проведению исследований и интерпретации их результатов, позволяющих достоверно определять фильтрационные параметры продуктивных пластов при их эксплуатации горизонтальными скважинами.

**Объект:** сложнопостроенные турнейско-фаменские карбонатные коллектора месторождений Пермского края, эксплуатирующиеся горизонтальными скважинами.

**Методы:** геофизические и гидродинамические исследования скважин, лабораторные исследования керна, многомерное статистическое моделирование.

**Результаты.** Установлено, что в рассматриваемых условиях геофизические исследования, материалы которых интерпретированы в соответствии с алгоритмами для вертикальных скважин, не позволяют достоверно оценивать длину горизонтального участка ствола, обеспечивающего приток флюида, а также фильтрационные свойства коллектора. В свою очередь, определение фильтрационных свойств рекомендуется осуществлять при интерпретации данных гидродинамических исследований скважин. Алгоритмы современных методов интерпретации гидродинамических исследований, реализованные в распространенных программных продуктах, позволяют определять большой объем геолого-промысловых данных, в том числе ряд параметров, специфичных для горизонтальных скважин. Однако данная процедура сопровождается неопределенностями, например, в части выбора интерпретационных моделей. Выполненное многомерное статистическое моделирование позволило обосновать методологию достоверного определения фильтрационных свойств рассматриваемых пластов и подход по снижению неопределенностей при выборе интерпретационных моделей.

### Ключевые слова:

горизонтальные скважины, сложнопостроенные карбонатные коллектора, геофизические исследования, гидродинамические исследования, многомерное статистическое моделирование.

### Введение

В настоящее время в промышленную разработку вводится все большее количество активов, запасы которых по тому или иному признаку можно отнести к категории трудноизвлекаемых (ТРИЗ). На нефтяных месторождениях Пермского края отнесение запасов к указанной категории зачастую осуществляется в связи с низкой проницаемостью карбонатных коллекторов со сложным строением пустотного пространства [1].

Карбонатные коллектора имеют сложную структуру и вызывают большой научный интерес, при этом большое количество исследовательских задач остаются актуальными. Сложнопостроенный карбонатный коллектор включает различные комбинации систем матрикса, трещин и каверн и, таким образом, обладает неоднородными пористостью, проницаемостью, и характеризуется сложной геометрией течения флюидов [2]. Задача о течении жидкости через пористую среду коллектора представляет собой сложную инверсную структуру, которая

в некоторых случаях усугубляется неувловимым поведением потока, характерным для карбонатов.

Эффективная выработка запасов углеводородов из сложнопостроенных карбонатных коллекторов осуществляется при реализации систем разработки, включающих горизонтальные скважины (скважины с горизонтальным окончанием ствола). При этом в настоящее время в недостаточной степени решены многие проблемы эксплуатации скважин такой конструкции, в том числе вопросы проведения их исследований и методологии интерпретации результатов. В условиях отсутствия технической возможности отбора керна из большинства горизонтальных скважин их геофизические (ГИС) и гидродинамические (ГДИ) исследования приобретают особо важное значение. При этом проведение и геофизических, и гидродинамических исследований в горизонтальных скважинах сопровождается определенными затруднениями.

За последние 25 лет проведено множество исследований, посвященных изучению фильтрации флюида к горизонтальным скважинам в сложнопостроенных коллекторах. В работе [3] авторы использовали коробчатую модель резервуара для анализа снижения и повышения давления в горизонтальных скважинах в анизотропных средах и выполнили анализ полулогарифмических кривых зависимости давления от времени. Кучук и др. [4] представили аналитические решения в режиме реального времени для горизонтальных скважин в коробчатых коллекторах и построили кривые давления и производной давления. Также авторы проанализировали поведение давления в горизонтальных скважинах в многопластовых коллекторах с попереженным перетоком и сформулировали аналитические решения. В работе [5] авторы представили модель горизонтальной скважины и модель скважины с трещинами как для коробчатых, так и для цилиндрических коллекторов, а также для коллекторов с однородными и двойными средами. В работе [6] автор изучил аналитическое стационарное решение однозондовых испытаний в горизонтальной скважине.

Проблематику геофизических исследований горизонтальных скважин можно условно разделить на две группы – обеспечение доставки и перемещения геофизических приборов (зондов) по горизонтальному участку ствола, а также адаптация подходов к интерпретации, необходимость которой обусловлена отличающимся направлением измерений. При этом проблематика адаптации подходов к интерпретации результатов измерений в настоящее время решена в недостаточной степени. Проблема доставки и перемещения приборов в настоящее время успешно решается с помощью специальных устройств, например, описанных в работах [7], либо за счет использования технологий LWD (Logging While Drilling – каротаж в процессе бурения). Так, наиболее информативные технологии LWD позволяют оценить структуру и емкостные свойства пустотного пространства, характер его насыщения. Важнейшая задача интерпретации ГИС – дифференциация вскрытой части разреза на коллектор/неколлектор, осуществляется с использованием подходов, аналогичных условно вертикаль-

ным скважинам. При этом горная порода относится к коллектору при превышении его пористости граничного значения, утвержденного при подсчете запасов. При этом в научных работах неоднократно отмечаются случаи, когда потокометрические исследования демонстрируют работу интервалов, ранее по данным ГИС отнесенных к неколлектору. В контексте исследований горизонтальных скважин данная проблема усугубляется вероятным влиянием гравитационных сил и вертикальной составляющей проницаемости.

При обобщении накопленного опыта проведения исследований в горизонтальных скважинах региона установлено, что зачастую комплексы LWD демонстрируют невысокую долю коллектора в общей проходке по пласту. Для примера на рис. 1 приведены результаты исследований, выполненных по технологии LWD, для скв. 328 (турнейско-фаменский объект) одного из месторождений Пермского края.

Как следует из анализа представленных данных, горизонтальный участок ствола на всей протяженности находится в пределах целевого продуктивного пласта. Однако сопоставление пористости интервалов с граничным значением, принятым для объекта равным 5 %, позволило отнести только 29 % вскрытой части к коллектору. При этом начальный дебит скважины превышает/соответствует проектному значению, рассчитанному без учета низкой доли коллектора во вскрытой части разреза [8].

Для исследования вероятных причин отмеченного явления привлечены материалы исследований керна (рис. 2), отобранного из расположенной в непосредственной близости условно вертикальной скважины.

В ходе исследований керна установлено, что коллектор целевого объекта представлен разнотерриторным известняком с микро-мелкозернистой структурой, в пределах образцов выделяются трещины, обычно полые, частично заполненные тонкодисперсным карбонатно-глинистым материалом. В целом структуру пустотного пространства следует охарактеризовать как сложную. Вероятно, сложное строение пустотного пространства является причиной отнесения высокой доли вскрытых горизонтальным стволом пород к непроницаемым (неколлектору).

При отсутствии керна и ограниченной информативности методов ГИС отдельно следует обозначить проблему определения и трактовки величины проницаемости в зонах дренирования горизонтальных скважин [9]. Подход, основанный на пересчете пустотности (пористости) карбонатных пород, определенной по ГИС, в проницаемость с использованием петрофизической зависимости, демонстрирует невысокую достоверность, что подтверждается выводами научных исследований [8]. В указанных условиях возрастает роль ГДИ как эффективного инструмента определения фильтрационных свойств коллекторов, в том числе коэффициента проницаемости. Направлением совершенствования методологии определения фильтрационно-емкостных свойств карбонатных коллекторов при их эксплуатации горизонтальными скважинами следует считать комплексирование LWD и гидродинамических исследований.

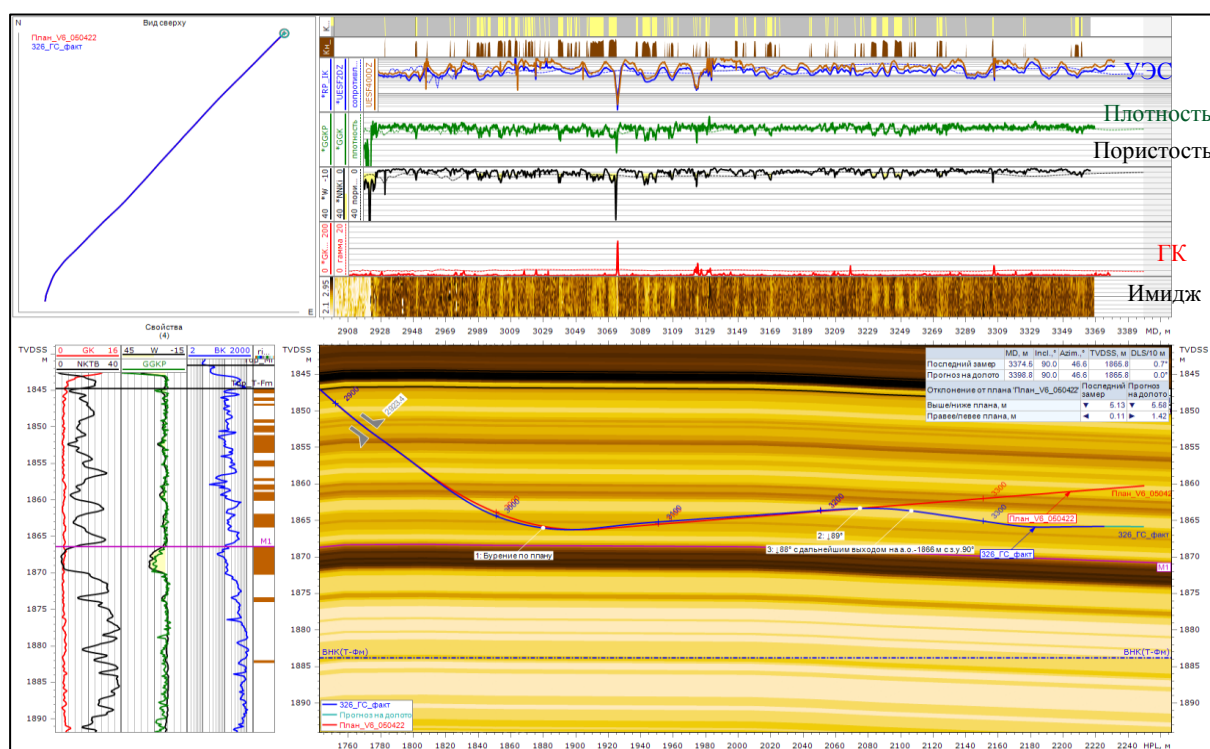


Рис. 1. Фактический геонавигационный разрез по горизонтальной скважине

Fig. 1. Actual geosteering section along a horizontal well

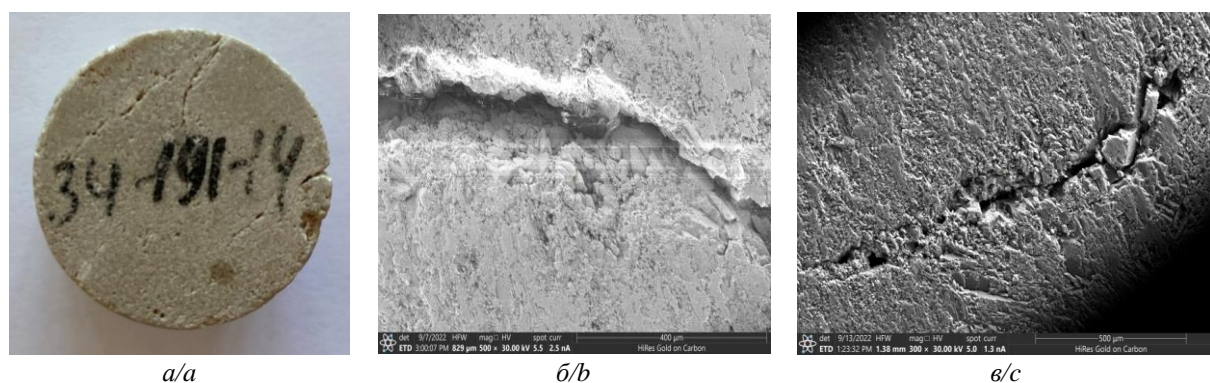


Рис. 2. Изображения образца керна целевого турнейско-фаменского объекта: а) общий вид; б, в) данные электронной микроскопии

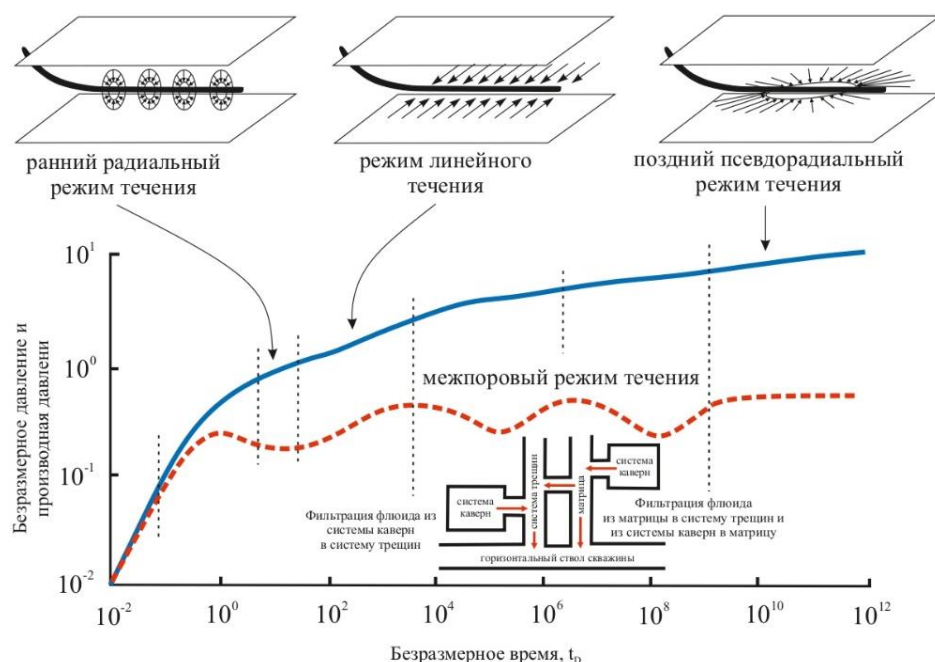
Fig. 2. Images of the core sample of the considered carbonate object: a) general view; b, c) electron microscopy data

Современные алгоритмы интерпретации кривых восстановления давления (КВД), получаемых при ГДИ, реализованные, например, в программном комплексе Карра Workstation (либо аналоги), характеризуются существенно более высокой информативностью по сравнению с традиционными (графоаналитическими) методами. Основанием применения модели является специфический вид графика [10–12] в диагностических координатах, который, в свою очередь, обоснован исходя из особенностей геометрии притока флюида (рис. 3).

В данной статье особенности проведения и интерпретации ГДИ в горизонтальных скважинах проанализированы на примере турнейско-фаменского карбонатного объекта разработки одного из месторождений Пермского края. Специфической особенностью месторождения является реализация системы разра-

ботки, включающей в равных долях горизонтальные (16 ед.) и условно вертикальные скважины (16 ед.). Из общего количества исследований, выполненных на горизонтальных скважинах за весь период их эксплуатации, только 10 % кривых восстановления давления имеют вид, соответствующий теоретическим представлениям Карра Workstation. В остальных случаях график КВД не соответствует модели «горизонтальная скважина», реализованной в алгоритмах программного комплекса. Очевидно, обоснование методологии интерпретации таких кривых восстановления давления является актуальной задачей, в контексте решения которой возможны два направления: использование модели «вертикальная скважина» либо принудительное наложение модели «горизонтальная скважина» вопреки виду КВД.





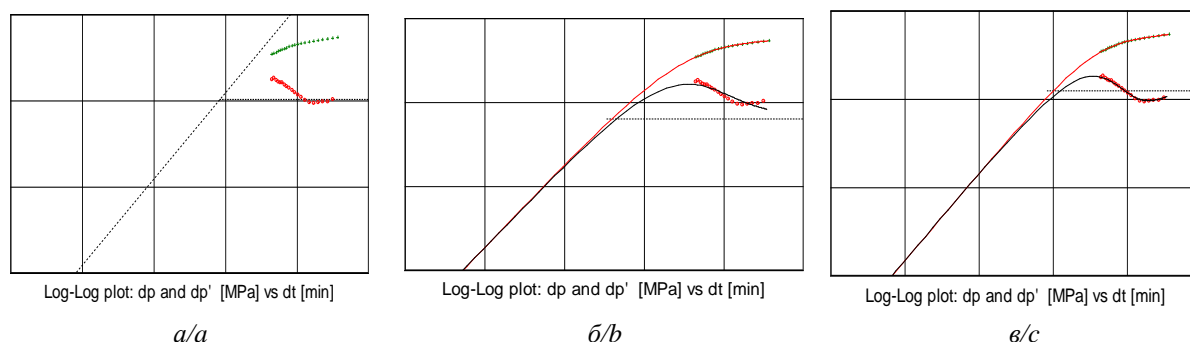
**Рис. 3.** Вид графика КВД в условиях сложной геометрии притока жидкости к горизонтальным скважинам [13–18]  
**Fig. 3.** View of the pressure build-up schedule in conditions of complex geometry of fluid inflow to horizontal wells [13–18]

Интерпретация кривых восстановления давления, выполняемая в Kappa Workstation с применением модели «горизонтальная скважина», позволяет определять ряд специфических параметров, которые, вероятно, оказывают влияние на процессы фильтрации к горизонтальным стволам: анизотропия проницаемости, работающая длина горизонтального ствола, составляющие скин-фактора [19–21]. При интерпретации КВД с применением модели «вертикальная скважина» получают три основные характеристики гидродинамической системы «пласт–скважина»: проницаемость удаленной от скважины зоны пласта, скин-фактор и пластовое давление. Определение дополнительных параметров возможно при усложнении интерпретационной модели ствола скважины, пласта и его границ. Проницаемость, определяемая при использовании модели «вертикальная скважина», характеризует фильтрационные свойства пласта в горизонтальном (латеральном) направлении. При этом

геометрия течения к горизонтальным скважинам подразумевает перемещение флюида в вертикальном направлении, как следствие возникает вопрос о целесообразности определения вертикальной составляющей проницаемости коллектора [22–26].

Для решения указанной задачи в рамках настоящего исследования привлечены материалы тридцати исследований горизонтальных скважин методом восстановления давления. Каждая из КВД обработана в Kappa Workstation дважды, с наложением моделей «вертикальная скважина» и «горизонтальная скважина».

При этом следует отметить, что даже при отсутствии четко обозначенного участка билинейного потока на графике КВД использование модели «горизонтальная скважина» зачастую обеспечивает лучшую визуальную сходимость модельной и фактической КВД, что продемонстрировано на примере исследований одной скважины (рис. 4).



**Рис. 4.** Пример совмещения фактической и модельной КВД: а) фактическая КВД; б) совмещение фактической КВД с моделью «вертикальная скважина»; в) совмещение фактической КВД с моделью «горизонтальная скважина»

**Fig. 4.** Example of combining the actual and model pressure build-up: а) actual pressure build-up; б) combination of the actual pressure build-up with the «vertical well» model; в) combination of the actual pressure build-up with the «horizontal well» mode

На приведенной в качестве примера кривой восстановления давления (рис. 4, а) участок билинейного течения, соответствующий теоретическим представлениям, не выделяется в полной мере. Сравнительная интерпретация КВД показала наилучшее визуальное совмещение при использовании расчетной модели «горизонтальная скважина» (при прочих равных условиях).

Аналогичным образом, с использованием двух моделей, интерпретированы все кривые восстановления давления горизонтальных скважин месторождения. Результаты интерпретации дополнены геолого-технологическими характеристиками исследуемых скважин. Следует отметить, что гидродинамические параметры, определяемые при интерпретации одних и тех же данных с применением разных моделей, характеризуются существенными различиями. В этой связи в качестве одной из задач настоящего исследования сформулирована необходимость обосновать достоверность параметров, определяемых при обработке КВД с применением моделей «вертикальная скважина» и «горизонтальная скважина». Для решения поставленной задачи использован способ, описанный в [27], заключающийся в построении и анализе многомерных статистических моделей дебитов жидкости. Считается, что наиболее достоверные параметры обеспечивают преимущественную работоспособность статистических моделей.

Используемая выборка включала следующие параметры:  $Q_{\text{ж}}$  – фактические дебиты жидкости;  $P_{\text{пл}}$ ,  $P_{\text{заб}}$  – пластовое и забойное давления;  $h$  – эффективная нефтенасыщенная толщина пласта;  $L$  – длина горизонтального участка ствола;  $L_{\text{колл}}$  – длина горизонтального участка ствола, в пределах которого горная порода по ГИС отнесена к коллектору; результаты интерпретации КВД с применением модели «горизонтальная скважина» ( $S_{\text{полн}}$ ,  $S_{\text{геом}}$  – полный и геометрический скин-факторы;  $k_{\text{латер}}$  – латеральная проницаемость;  $k_{\text{аниз}}$  – коэффициент анизотропии проницаемости;  $L_{\text{раб}}^{\text{ГС}}$  – длина горизонтальной участка ствола, обеспечивающего приток), результаты интерпретации КВД с применением модели «вертикальная скважина» ( $k$  – проницаемость;  $S$  – скин-фактор).

Первая многомерная модель дебитов ( $Q_{\text{ж}}^{M1}$ ) построена при использовании в качестве исходных данных результатов интерпретации, полученных при выборе модели «горизонтальная скважина»:

$$Q_{\text{ж}}^{M1} = -1,724S_{\text{полн}} - 17,042k_{\text{аниз}} + 1,423h + 0,020L_{\text{раб}}^{\text{ГС}} + 8,679. \quad (1)$$

Модель характеризуется следующими статистическими оценками: коэффициент детерминации  $R=0,80$ ; уровень значимости  $p<0,00012$ ; стандартная ошибка расчета  $S_0=5,8 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

Вторая многомерная модель дебитов ( $Q_{\text{ж}}^{M2}$ ) построена при использовании в качестве исходных данных результатов интерпретации, полученных при выборе модели «вертикальная скважина»:

$$Q_{\text{ж}}^{M2} = -0,459S + 18,514, \quad (2)$$

при  $R=0,45$ ;  $p<0,012$ ;  $S_0=8,4 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

Необходимо отметить, что целью построения моделей (1), (2) является не получение работоспособных формул дебита, а сравнительная оценка методов интерпретации кривых восстановления давления. Стоит отметить, что выполненное многомерное статистическое моделирование позволяет оценить формирование дебита и выделить факторы, оказывающие на него наибольшее влияние [27].

При сравнительном анализе уравнений (1), (2) можно сделать следующие основные выводы:

- гидродинамические параметры, определяемые при интерпретации КВД с использованием модели «горизонтальная скважина» оказывают существенно большее влияние на дебиты скважин, что свидетельствует о предпочтительности данного подхода;
- исходя из предыдущего вывода, можно сделать заключение о том, что даже при отличии графика КВД от теоретического для горизонтальной скважины вида его интерпретацию необходимо выполнять с применением модели «горизонтальная скважина».

Исходя из приоритетной работоспособности уравнения (1), представляется актуальным анализ включенных в него параметров. Уравнение включает практически все специфические параметры, определяемые при интерпретации с применением модели «горизонтальная скважина». Следует отметить, что в уравнении отсутствуют проницаемости в различных направлениях, но включен коэффициент их анизотропии, что подтверждает теорию сферичности фильтрационных потоков к горизонтальным скважинам и подчеркивает целесообразность ее учета при проектировании разработки месторождений. Латеральная проницаемость, определяемая при интерпретации с использованием модели «вертикальная скважина», не включена в результирующее уравнение притока, что также подтверждает обозначенный вывод.

Включение параметра  $L_{\text{раб}}^{\text{ГС}}$  в уравнение (1) свидетельствует о достоверности его определения. Однако необходимо отметить, что его значения, определенные при интерпретации КВД, зачастую превышают фактическую длину горизонтального участка ствола. Например, для скважин рассматриваемого объекта разработки среднее значение фактической длины горизонтального участка ствола составляет 250 м, а среднее значение параметра  $L_{\text{раб}}^{\text{ГС}}$  равно 602 м. Данная проблема требует детального изучения, что будет выполнено в ходе дальнейших исследований. В качестве наиболее вероятной гипотезы можно предположить, что параметр  $L_{\text{раб}}^{\text{ГС}}$  является размером латеральной проекции зоны дренирования пласта горизонтальной скважиной [28]. Например, в известной формуле Joshi данная величина представляет собой большую полуось эллипса, аналогичного радиусу контура питания  $R_k$ .

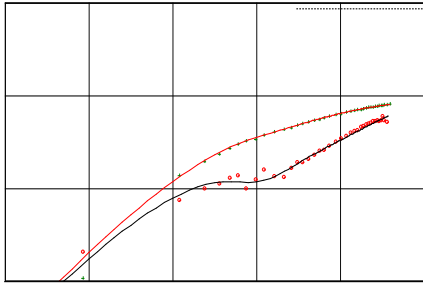
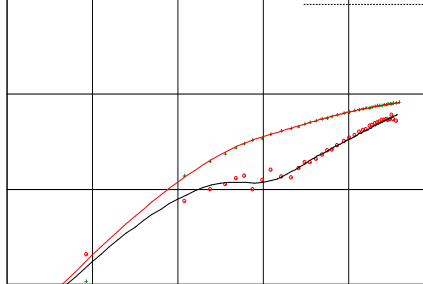
В контексте полученного вывода о целесообразности принудительного использования модели «горизонтальная скважина» необходимо отметить еще одну проблему интерпретации кривых восстановления

давления в современных программных продуктах, такую как высокая степень неопределенности принятия решений. Одним из главных принципов выбора комплексной интерпретационной модели (влияние ствола скважины – скважина – пласт – граница пласта) является обеспечение наилучшего совмещения с фактической кривой восстановления давления, что оценива-

ется специалистом на визуальном уровне. При этом зачастую разные модели обеспечивают одинаковую сходимость с фактическими данными, но с существенно различающимися результатами. В качестве примера в таблице приведены сравнительные результаты интерпретации КВД одной из скважин с применением двух различных моделей.

**Таблица.** Сравнение результатов интерпретации кривых восстановления давления

**Table.** Comparison of the results of interpretation of the pressure recovery curves.

Критерий/Criterion	Модель 1/Model 1	Модель 2/Model 2
Визуальное совмещение Visual alignment		
Проницаемость $k$ , мкм <sup>2</sup> Permeability $k$ , $\mu\text{m}^2$	0,16	8,20
Скин-фактор $S$ , б/р Skin factor $S$ , dimensionless	–9,01	–0,03
Пластовое давление $P_i$ , МПа Reservoir pressure $P_i$ , MPa	9,86	8,31
Пластовое давление (графоаналитический метод произведения) Reservoir pressure (graphic-analytical product method)	8,37	

В обоих случаях в ходе интерпретации удалось добиться высокой степени совмещения кривых с применением различных инструментов. Как следствие, результаты интерпретации различны. Для снижения неопределенности при выборе моделей предлагается сравнивать результаты интерпретации с данными, полученными принципиально другим путем. Применяемые ранее графоаналитические методы интерпретации позволяют довольно устойчиво определять величину пластового давления, например, методом произведения [29]. Соответственно, дополнительная интерпретация КВД методом произведения не является трудозатратным мероприятием, но ее практическое применение позволит оперативно устранить неопределенности при выборе интерпретационных моделей. Так, для рассматриваемой скважины величина пластового давления по методу произведения составляет 8,37 МПа, что соответствует результатам интерпретации с использованием модели 2.

### Заключение

Эксплуатация сложнопостроенных карбонатных коллекторов горизонтальными скважинами сопровождается проблематикой определения фильтрационных свойств продуктивных пластов.

В условиях отсутствия технической возможности отбора керна затрудняется определение проницаемо-

сти посредством пересчета и пористости, определенной по ГИС, что способствует повышению значимости гидродинамических исследований.

Практическое применение современных методов интерпретации кривых восстановления давления сопровождается рядом неопределенностей. В ходе выполненных исследований доказано, что даже при несоответствии графика КВД горизонтальной скважины теоретическим представлениям целесообразно использовать интерпретационную модель «горизонтальная скважина».

Выполненная статистическая обработка промысловых данных позволила подтвердить теоретическое представление о сферичности фильтрационных потоков к горизонтальным скважинам, о значимом влиянии анизотропии проницаемости на процессы фильтрации и целесообразности ее практического определения.

В качестве инструмента для снижения неопределенности выбора интерпретационных моделей предлагается дополнять интерпретацию КВД графоаналитическим методом произведения.

*Исследование проведено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы деятельности научно-образовательного центра мирового уровня «Рациональное недропользование».*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Study of void space structure and its influence on carbonate reservoir properties: X-ray microtomography, electron microscopy, and well testing / D.A. Martyushev, I.N. Ponomareva, A.S. Chukhlov, S. Davoodi, B.M. Osovetsky, K.P. Kazymov, Y. Yang // *Marine and Petroleum Geology*. – 2023. – V. 151. – 106192. URL: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106192> (дата обращения 15.11.2022).
2. Чучалина К.Ю., Коровин М.О. Особенности петрофизических свойств сложнопостроенных карбонатных толщ по комплексным геофизическим данным // *Известия томского политехнического университета. инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 107–113. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7/3268> (дата обращения 15.11.2022).
3. Goode P.A., Thambynayagam R.K.M. Pressure drawdown and buildup analysis of horizontal wells in anisotropic media. // *Transactions of the AIME*. – 1987. – V. 283. – P. 683–697.
4. Pressure-Transient Behavior of Horizontal Wells With and Without Gas Cap or Aquifer / F.J. Kuchuk, P.A. Goode, D.J. Wilkinson, R.K.M. Thambynayagam. // *SPE Formation Evaluation*. – 1991. – V. 6. – Iss. 1. – P. 86–94. URL: <https://doi.org/10.2118/17413-PA> (дата обращения 15.11.2022).
5. Ozkan, E., Raghavan, R., Joshi, S.D. Horizontal well pressure analysis // *SPEFE*. – 1989. – P. 567.
6. Rakesh Kumar Pandey, Anil Kumar, Ajay Mandal. A robust deep structured prediction model for petroleum reservoir characterization using pressure transient test data // *Petroleum Research*. – 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2021.09.003> (дата обращения 15.11.2022).
7. Технологии геофизических исследований бурящихся и эксплуатируемых горизонтальных скважин / А.В. Шумилов, В.И. Костицын, А.Д. Савич, О.Л. Сальникова, И.Ф. Шумский, Д.А. Будник // *Нефтяное хозяйство*. – 2018. – № 2. – С. 48–52. URL: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-2-48-52> (дата обращения 15.11.2022).
8. Бергенов С.У., Чернова О.С., Зипир М.Г. Методика оценки ожидаемых запусковых дебитов горизонтальных скважин на примере газоконденсатных месторождений // *Известия томского политехнического университета. инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 207–212. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/3/2563> (дата обращения 15.11.2022).
9. Application of deep learning on well-test interpretation for identifying pressure behavior and characterizing reservoirs / Peng Dong, Zhiming Chen, Xinwei Liao, Wei Yu // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – V. 208 (P. E). – 109264. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109264> (дата обращения 15.11.2022).
10. Диагностические критерии выделения фильтрационных потоков в процессе гидродинамических исследований горизонтальных скважин / В.Л. Сергеев, В.Х. Донг, Д.Э. Хагай, А.В. Игнатенко // *Известия томского политехнического университета. инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 181–187. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/2/2504> (дата обращения 15.11.2022).
11. Сергеев В.Л., Донг В.Х., Фам Д.А. Адаптивная интерпретация результатов гидродинамических исследований горизонтальных скважин на прогнозирующих моделях // *Известия томского политехнического университета. инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 165–172. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/1/62> (дата обращения 15.11.2022).
12. Сергеев В.Л., Донг В.Х. Идентификация фильтрационных потоков в процессе гидродинамических исследований горизонтальных скважин с трещинами гидроразрыва пласта // *Известия томского политехнического университета. инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 3. – С. 103–110. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/3/171> (дата обращения 15.11.2022).
13. Single- and two-phase flow model in low-permeability reservoir / Song Fuquan, Song Xingxing, Wang Yong, Sun Yeheng // *Petroleum*. – 2019. – V. 5. – Iss. 2. – P. 183–190. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.05.004> (дата обращения 15.11.2022).
14. A high-resolution numerical well-test model for pressure transient analysis of multistage fractured horizontal wells in naturally fractured reservoirs / Hui Liu, Xinwei Liao, Xiaoliang Zhao, Luyang Sun, Xuefeng Tang, Lin Zhao // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – V. 208 (P. B). – 109417. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109417> (дата обращения 15.11.2022).
15. Analyzing Pressure Interference Between Horizontal Wells During Fracturing / Puneet Seth, Ripudaman Manchanda, Ashish Kumar, Mukul M. Sharma // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – V. 204. – 108696. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108696> (дата обращения 15.11.2022).
16. A well test model based on embedded discrete-fracture method for pressure-transient analysis of fractured wells with complex fracture networks / Hui Liu, Xinwei Liao, Xuefeng Tang, Zhiming Chen, Xiaoliang Zhao, JianDong Zou // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – V. 196. – 108042. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108042> (дата обращения 15.11.2022).
17. Geological interpretation of channelized heterolithic beds through well test analysis / R. Osorio, A. Sharifi Haddad, E. Stephens, H. Hamidi // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2017. – V. 158. – P. 516–528. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.08.078> (дата обращения 15.11.2022).
18. Analytical solutions for injectivity and falloff tests in stratified reservoirs with multilateral horizontal wells / Renan Vieira Bela, Sinesio Pesco, Abelardo Borges, Barreto Jr., Mustafa Onur // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2021. – V. 197. – 108116. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108116> (дата обращения 15.11.2022).
19. Renan Vieira Bela, Sinesio Pesco, Abelardo Borges Barreto Jr. Impulse functions applied to compute pressure change during injectivity tests // *Fuel*. – 2022. – V. 310 (P. B). – 122392. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122392> (дата обращения 15.11.2022).
20. Well testing interpretation for horizontal well with hydraulic fractures and interconnected micro-fractures / Xuefeng Tang, Zhiming Chen, Hongyang Chu, Xinwei Liao, Haoshu Chen, Jiali Zhang // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2019. – V. 179. – P. 546–557. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.04.074> (дата обращения 15.11.2022).
21. A new production decline model for horizontal wells in low-permeability reservoirs / Pingyou Li, Mingqiang Hao, Jinghong Hu, Zhixing Ru, Zhiping Li // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2018. – V. 171. – P. 340–352. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.07.059> (дата обращения 15.11.2022).
22. A modeling study of the productivity of horizontal wells in hydrocarbon-bearing reservoirs: effects of fracturing interference / Lei Huang, Peijia Jiang, Xuyang Zhao, Liang Yang, Jiaying Lin, Xuyang Guo // *Geofluids*. – 2021. – V. 2021. – 2168622. URL: <https://doi.org/10.1155/2021/2168622> (дата обращения 15.11.2022).
23. A new evaluation of skin factor in inclined wells with anisotropic permeability / E. Abobaker, A. Elsanooze, F. Khan, M.A. Rahman, A. Aborig, K. Noah // *Energies*. – 2021. – V. 14 (17). – P. 5585. URL: <https://doi.org/10.3390/en14175585> (дата обращения 15.11.2022).
24. Combining experimental and logging data for calculation of the true skin factor of a horizontal well / Yongxin Ma, Mingjun Li, Yao Li, Peng Liu, Binghua Yang, Hongyi Gao // *Energy Science and Engineering*. – 2021. – V. 9. – Iss. 9. – P. 1385–1393. URL: <https://doi.org/10.1002/ese3.899> (дата обращения 15.11.2022).
25. Pressure transient analysis of horizontal wells in multibranched fault-karst carbonate reservoirs: Model and application in SHB oilfield / Wenyang Shi, Jian Chen, Lei Tao, Yongchuan Liu, Jiajia Bai, Zhenglin Jiang, Qingjie Zhu // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2022. – 111167. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111167> (дата обращения 15.11.2022).
26. Ponomareva I.N., Martyushev D.A., Govindarajan S.K. A new approach to predict the formation pressure using multiple regression analysis: case study from Sukharev oil field reservoir – Russia // *Journal of King University – Engineering Sciences*. – 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.03.005> (дата обращения 15.11.2022).
27. Особенности формирования призабойных зон продуктивных пластов на месторождениях с высокой газонасыщенностью

- пластовой нефти / В.И. Галкин, Д.А. Мартюшев, И.Н. Пономарева, И.А. Черных // Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 386–392. URL: <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.7> (дата обращения 15.11.2022).
28. Searching for reservoirs with bypassed oil using well tests and mathematical modeling / P.V. Kryganov, I.V. Afanaskin, S.G. Volpin, M.Yu. Akhapiin, P.V. Yalov // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 206. – 109077. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109077> (дата обращения 15.11.2022).
29. Пономарева И.Н. К обработке кривых восстановления давления низкопродуктивных скважин // Нефтяное хозяйство. – 2010. – № 6. – С. 78–79.

Поступила: 01.12.2022 г.

Прошла рецензирование: 13.12.2022 г.

#### Информация об авторах

**Сальникова О.Л.**, главный геолог ПАО «Пермнефтегеофизика».

**Черных И.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры геологии нефти и газа Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Мартюшев Д.А.**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

**Пономарева И.Н.**, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276

## FEATURES OF DETERMINING FILTRATION PARAMETERS OF COMPLEX CARBONATE RESERVOIRS AT THEIR OPERATION BY HORIZONTAL WELLS

Olga L. Salnikova<sup>1</sup>,  
olga\_saln@mail.ru

Irina A. Chernykh<sup>2</sup>,  
Irina.Chernykh@lp.lukoil.com

Dmitriy A. Martyushev<sup>2</sup>,  
martyushevd@inbox.ru

Inna N. Ponomareva<sup>2</sup>,  
permpolitech@gmail.com

<sup>1</sup> PJSC «Permneftegeofizika»,  
34, Lodygin street, Perm, 614090, Russia.

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University,  
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the fact that in the conditions of continuous deterioration in the structure of hydrocarbon reserves, complex technologies for their development are being implemented, based, among other things, on the use of wells of complex design (horizontal wells). The increase in the share of horizontal wells in the total operating stock determines the relevance of the scientific and methodological justification of research technologies that comprehensively take into account the structural features of the reservoir and the geometry of the fluid flow. The most complete volume of geological and field information can be obtained by combining two main types of research – geophysical and hydrodynamic. The problem of data, in fact, of the indirect research methods, should be considered the need to assess the reliability of their results and the lack of approaches to reduce interpretation uncertainties, which is especially important in the conditions of the impossibility of coring in horizontal wells. This article proposes possible directions for solving these problems.

**The main aim** of the study is the scientific substantiation of approaches to research and interpretation of their results, allowing reliably determining the filtration parameters of productive formations during their operation with horizontal wells.

**Object:** complex Tournaisian-Famenian carbonate reservoirs in Perm region, operated by horizontal wells.

**Methods:** geophysical and hydrodynamic studies of wells, laboratory core studies, multivariate statistical modeling.

**Results.** It has been established that geophysical studies (interpretation was made in accordance with the algorithms for vertical wells) do not allow reliably estimating the length of the horizontal section of the wellbore and the filtration properties of the reservoir. It is recommended to determine the filtration properties when interpreting the data of hydrodynamic studies of wells. Algorithms of modern methods of interpretation of hydrodynamic studies, implemented in common software products, allow you to determine a large amount of geological and field data, including a number of parameters specific to horizontal wells. However, this procedure is accompanied by uncertainties, for example, in terms of the choice of interpretation models. The performed multivariate statistical modeling made it possible to substantiate the methodology for reliably determining the filtration properties of the reservoirs under consideration and the approach to reduce uncertainties when choosing interpretation models.

### Key words:

horizontal wells, complex carbonate reservoirs, geophysical surveys, hydrodynamic surveys, multivariate statistical modeling.

*This research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the program of activities of the Perm Scientific and Educational Center «Rational Subsoil Use».*

### REFERENCES

1. Martyushev, D.A., Ponomareva, I.N., Chukhlov, A.S., Davoodi, S., Osovetsky, B.M., Kazymov, K.P., Yang, Y. Study of void space structure and its influence on carbonate reservoir properties: X-ray microtomography, electron microscopy, and well testing. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, vol. 151, 106192. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2023.106192> (accessed 15 November 2022).
2. Chuchalina K.Yu., Korovin M.O. Specific features of petrophysical properties of complex carbonate reservoir by complex geophysical data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 7, pp. 107–113. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7/3268> (accessed 15 November 2022).
3. Goode P.A., Thembynayagam R.K.M. Pressure drawdown and buildup analysis of horizontal wells in anisotropic media. *Transactions of the AIME*, 1987, vol. 283, pp. 683–697.
4. Kuchuk F.J., Goode P. A., Wilkinson D.J., Thembynayagam R.K.M. Pressure-Transient Behavior of Horizontal Wells With and Without Gas Cap or Aquifer. *SPE Formation Evaluation*, 1991, vol. 6, iss. 1, pp. 86-94. Available at: <https://doi.org/10.2118/17413-PA> (accessed 15 November 2022).
5. Ozkan, E., Raghavan, R., Joshi, S.D. Horizontal well pressure analysis. *SPEFE*, 1989, p. 567.
6. Rakesh Kumar Pandey, Anil Kumar, Ajay Mandal. A robust deep structured prediction model for petroleum reservoir characterization using pressure transient test data. *Petroleum Research*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2021.09.003> (accessed 15 November 2022).
7. Shumilov A.V., Kostitsyn V.I., Savich A.D., Salnikova O.L., Shumsky I.F., Budnik D.A. Logging techniques for horizontal



- wells under drilling and operation. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2019, no. 2, pp. 48–52. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-2-48-52> (accessed 15 November 2022).
8. Bergenov S.U., Chernova O.S., Zipir M.G. Methodology for assessing the expected starting flow rates of horizontal wells in gas and gas condensate fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 3, pp. 207–212. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/3/2563> (accessed 15 November 2022).
  9. Peng Dong, Zhiming Chen, Xinwei Liao, Wei Yu. Application of deep learning on well-test interpretation for identifying pressure behavior and characterizing reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208 (P. E), 109264. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109264> (accessed 15 November 2022).
  10. Sergeev V.L., Van Hoang D., Khagay D.E., Ignatenko A.V. Diagnostic criteria for identification of filtration flows during horizontal well tests. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 181–187. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/2/2504> (accessed 15 November 2022).
  11. Sergeev V.L., Van Hoang D., An P.D. Adaptive interpretation of the results of horizontal well production testing using forecasting models. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 165–172. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/1/62> (accessed 15 November 2022).
  12. Sergeev V.L., Van Hoang D. Identification of filtration flow regimes in hydrodynamic studies of horizontal wells with hydraulic fractures. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 3, pp. 103–110. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/3/171> (accessed 15 November 2022).
  13. Song Fuquan, Song Xingxing, Wang Yong, Sun Yeheng. Single- and two-phase flow model in low-permeability reservoir. *Petroleum*, 2019, vol. 5, Iss. 2, pp. 183–190. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2018.05.004> (accessed 15 November 2022).
  14. Hui Liu, Xinwei Liao, Xiaoliang Zhao, Luyang Sun, Xuefeng Tang, Lin Zhao. A high-resolution numerical well-test model for pressure transient analysis of multistage fractured horizontal wells in naturally fractured reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208 (P. B), 109417. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109417> (accessed 15 November 2022).
  15. Puneet Seth, Ripudaman Manchanda, Ashish Kumar, Mukul M. Sharma. Analyzing Pressure Interference Between Horizontal Wells During Fracturing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 204, 108696. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108696> (accessed 15 November 2022).
  16. Hui Liu, Xinwei Liao, Xuefeng Tang, Zhiming Chen, Xiaoliang Zhao, JianDong Zou. A well test model based on embedded discrete-fracture method for pressure-transient analysis of fractured wells with complex fracture networks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 196, 108042. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108042> (accessed 15 November 2022).
  17. Rafael Osorio, Amin Sharifi Haddad, Ed Stephens, Hossein Hamidi. Geological interpretation of channelized heterolithic beds through well test analysis. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 158, pp. 516–528. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.08.078> (accessed 15 November 2022).
  18. Renan Vieira Bela, Sinesio Pesco, Abelardo Borges Barreto Jr., Mustafa Onur. Analytical solutions for injectivity and falloff tests in stratified reservoirs with multilateral horizontal wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 197, 108116. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108116> (accessed 15 November 2022).
  19. Renan Vieira Bela, Sinesio Pesco, Abelardo Borges Barreto Jr. Impulse functions applied to compute pressure change during injectivity tests. *Fuel*, 2022, vol. 310 (P. B), 122392. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122392> (accessed 15 November 2022).
  20. Xuefeng Tang, Zhiming Chena, Hongyang Chu, Xinwei Liao, Haoshu Chen, Jiali Zhang. Well testing interpretation for horizontal well with hydraulic fractures and interconnected micro-fractures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 179, pp. 546–557. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.04.074> (accessed 15 November 2022).
  21. Pingyou Li, Mingqiang Hao, Jinghong Hu, Zhixing Ru, Zhiping Li. A new production decline model for horizontal wells in low-permeability reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 171, pp. 340–352. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.07.059> (accessed 15 November 2022).
  22. Lei Huang, Peijia Jiang, Xuyang Zhao, Liang Yang, Jiaying Lin, Xuyang Guo. A modeling study of the productivity of horizontal wells in hydrocarbon-bearing reservoirs: effects of fracturing interference. *Geofluids*, 2021, vol. 2021, 2168622. Available at: <https://doi.org/10.1155/2021/2168622> (accessed 15 November 2022).
  23. Abobaker E., Elsanouse A., Khan F., Rahman M.A., Aborig A., Noah K. A new evaluation of skin factor in inclined wells with anisotropic permeability. *Energies*, 2021, vol. 14 (17), pp. 5585. Available at: <https://doi.org/10.3390/en14175585> (accessed 15 November 2022).
  24. Yongxin Ma, Mingjun Li, Yao Li, Peng Liu, Binghua Yang, Hongyi Gao. Combining experimental and logging data for calculation of the true skin factor of a horizontal well. *Energy Science and Engineering*, 2021, vol. 9, Iss. 9, pp. 1385–1393. Available at: <https://doi.org/10.1002/ese3.899> (accessed 15 November 2022).
  25. Wenyang Shi, Jian Chen, Lei Tao, Yongchuan Liu, Jiajia Bai, Zhenglin Jiang, Qingjie Zhu. Pressure transient analysis of horizontal wells in multibranch fault-karst carbonate reservoirs: model and application in SHB oilfield. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 111167. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111167> (accessed 15 November 2022).
  26. Ponomareva I.N., Martyushev D.A., Govindarajan S.K. A new approach to predict the formation pressure using multiple regression analysis: case study from Sukharev oil field reservoir – Russia. *Journal of King University – Engineering Sciences*, 2022. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2022.03.005> (accessed 15 November 2022).
  27. Galkin V.I., Martyushev D.A., Ponomareva I.N., Chernykh I.A. Developing features of the near-bottomhole zones in productive formations at fields with high gas saturation of formation oil. *Journal of Mining Institute*, 2021, vol. 249, pp. 386–392. In Rus. Available at: <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.7> (accessed 15 November 2022).
  28. Kryganov P.V., Afanaskin I.V., Volpin S.G., Akhapi M.Yu., Yalov P.V. Searching for reservoirs with bypassed oil using well tests and mathematical modeling. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 206, 109077. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109077> (accessed 15 November 2022).
  29. Ponomareva I.N. For processing of recovery curves of pressure of low-productive wells. *Neftyanoe Khozyaystvo – Oil Industry*, 2010, no. 6, pp. 78–79. In Rus.

Received: 1 December 2022.  
Reviewed: 13 December 2022.

#### Information about the authors

**Olga L. Salnikova**, chief geologist, PJSC «Permneftegeofizika».

**Irina A. Chernykh**, Cand. Sc., assistant professor, Perm National Research Polytechnic University.

**Dmitriy A. Martyushev**, Cand. Sc., assistant professor, Perm National Research Polytechnic University.

**Inna N. Ponomareva**, Cand. Sc., assistant professor, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 551.79:569.32:571.54

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ПЛЕЙСТОЦЕНА В РАЗРЕЗЕ ВИЛЬГОРТ (ЧЕРДЫНСКИЙ РАЙОН ПЕРМСКОГО КРАЯ)

**Плюснин Алексей Владимирович**<sup>1,2</sup>,  
a.v.plyusnin@mail.ru

**Сулима Александр Иванович**<sup>3</sup>,  
super.sulima2013@yandex.ru

**Маринов Владимир Аркадьевич**<sup>2</sup>,  
marinovva@mail.ru

**Вдовиченко Степан Евгеньевич**<sup>4</sup>,  
vdovichenko.stepan2001@yandex.ru

**Самодуров Сергей Анатольевич**<sup>5</sup>,  
samodurov.sergej@yandex.ru

<sup>1</sup> Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми,  
Россия, 614000, г. Пермь, ул. Советской Армии, 29.

<sup>2</sup> Тюменский Государственный университет,  
Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Ленина, 23.

<sup>3</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 614000, г. Пермь, ул. Букирева, 15.

<sup>4</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
Россия, 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1.

<sup>5</sup> Березниковский Дом детского и юношеского туризма и экскурсий,  
Россия, 618400, г. Березники, ул. Большевикский проезд, 7.

**Актуальность.** Изучение ледниковых отложений, являющихся одним из основных компонентов большинства континентальных осадочных формаций всех возрастов, позволяет выявить особенности их строения и формирования, а также установить фацально-генетическую приуроченность. Это главным образом актуально для четвертичной геологии, т. к. позволяет проводить стратиграфические сопоставления и выявлять палеогеографические обстановки формирования отложений. В данной работе представлены результаты комплексного литолого-биостратиграфического изучения разреза обнажения Вильгорт долины р. Колвы Чердынского района Пермского края.

**Цель:** изучение геологического разреза и обоснование возраста мезозойских отложений по комплексу фауны.

**Объекты:** континентальные отложения среднего плейстоцена, обнаженные в правом борту р. Колвы. Отложения данного района слабоизученные. В литературе присутствуют упоминания о мезозойской фауне, найденной в разрезе Вильгорт.

**Методы:** геокартирование, послойное литологическое описание, послойный отбор проб, биостратиграфические исследования.

**Результаты.** Данные исследования позволили провести детальное послойное описание и стратиграфическое расчленение разреза Вильгорт. На пермских карбонатных отложениях залегают элювиально-делювиальные отложения лихвинского горизонта, они перекрываются сначала озерно-ледниковыми, а затем ледниковыми отложениями днепровского горизонта среднего плейстоцена с эрратическими глыбами мезозойских, многократно переотложенных, терригенных пород. В связи с неотектонической активностью правобережной блоковой части Вильгортского участка, испытавшей в позднем плейстоцене воздымание, большинство верхнеплейстоценовых отложений претерпело размытие, чем и объясняется стратиграфическое несогласие, когда современные отложения залегают на ледниковых отложениях среднего плейстоцена. По результатам микропалеонтологических исследований определены фораминиферы из проб, отобранных в пятом слое: средневожского подъяруса волжского яруса (проба 1); распространенные в интервале рязанского яруса нижнего мела (проба 3); среднего и верхнего подъяруса волжского яруса (проба 4).

### Ключевые слова:

Днепровский горизонт, средний плейстоцен, четвертичная система, ледниковые отложения, Вильгорт, Чердынский район, Пермский край.

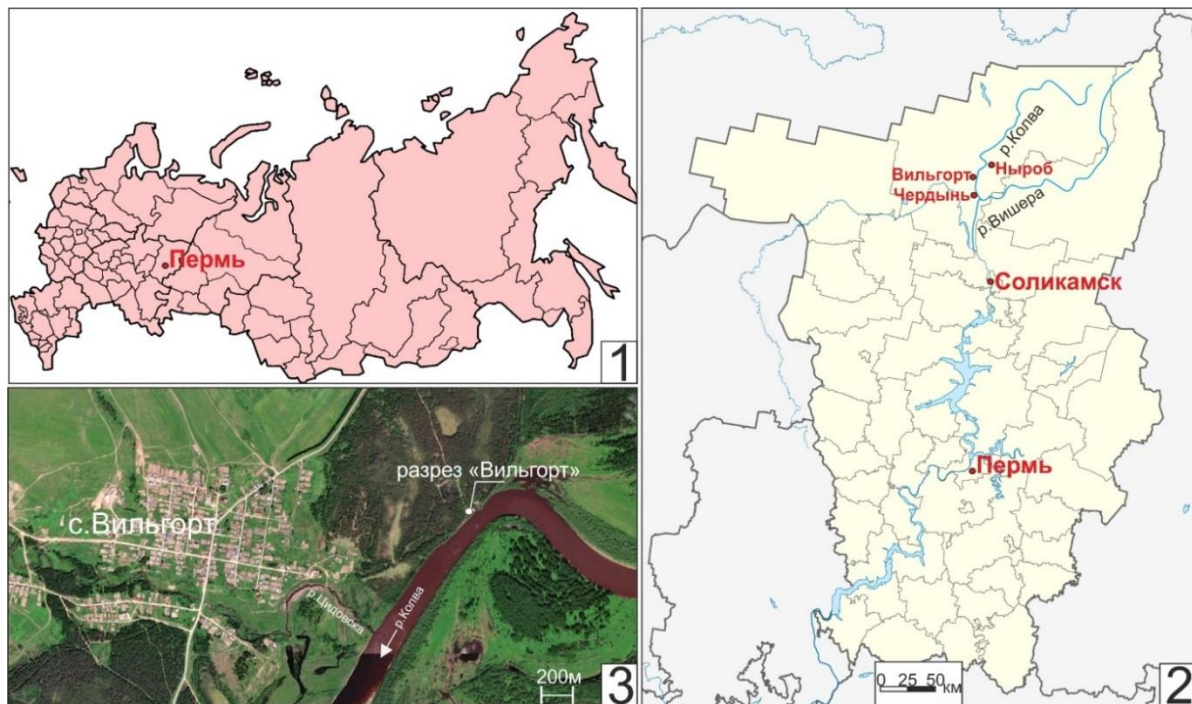
### Введение

Пермский край географически расположен на территории трех крупных структурных геологических зон: на восточной окраине Восточно-Европейской платформы, охватывая на востоке зоны Предуральского краевого прогиба и Уральской складчатой об-

ласти. На большей части территории на дневную поверхность выходят осадочные образования верхнего палеозоя и кайнозоя, вблизи Складчатого Урала – верхнего протерозоя. Мезозойские отложения имеются на самом северо-западе края, в Кировской области и в Республике Коми.

Обнаружение выходов мезозойских отложений с фауной в конце XIX и в начале XX вв. у деревни Вильгорт Чердынского района Пермского края, в 160

км восточнее зоны их развития, породило разные теории у исследователей, но природа их образования так и не была до конца изучена (рис. 1).



**Рис. 1.** Местоположение района исследований. Положение Пермского края на карте России (1); положение села Вильгорт на карте Пермского края (2); разрез Вильгорт на космоснимке (3)

**Fig. 1.** Research locations. Position of the Perm region on the map of Russia (1); position of Vilgort village on the map of the Perm Territory (2); Vilgort section on satellite image (3)

#### Материалы и методы

В основу работы легли полевые наблюдения: послойное литологическое описание разреза, отбор проб и образцов. При литолого-фациальном анализе авторы руководствовались отечественными [1–3] и зарубежными публикациями [4–11], по стратиграфии четвертичных отложений – работами [12–14]. Коллекция фауны была предоставлена руководителями геологических клубов: И.В. Сергеевой, почетным работником общего образования Российской Федерации, педагогом дополнительного образования, Пермская юношеская геологическая партия «Монолит» Муниципального Автономного Учреждения Дополнительного Образования «Дворец детского (юношеского) творчества» г. Перми и С.А. Самодуровым, педагогом дополнительного образования, Березниковская юношеская геологическая партия Муниципального Автономного Учреждения Дополнительного Образования «Дом детского и юношеского туризма и экскурсий» г. Березники. Пробы пород в количестве 6 штук и весом 1 кг каждая были отобраны в черных глинах в разрезе Вильгорт. Далее они перемывались для избавления от глинистой составляющей и изучались под бинокулярным микроскопом МБС-10. При определении фауны руководствовались следующей литературой [15, 16].

#### История изученности

Украшения из белемнитов и аммонитов известны по находкам из палеолитических стоянок соседней

Кировской области, а также могут присутствовать и в изучаемом районе. Первые упоминания в литературе появились в конце XIX в. В работе П.И. Кротова [17] рассматриваются ледниковые отложения Соликамского и Чердынского районов. Обнаружение фаунистических остатков мезозойского возраста в обнажениях долины р. Колва д. Селькова и д. Вильгорт объясняется тем обстоятельством, что данные окаменелости могли попасть сюда в результате разрушения и перетолжения моренных отложений реками и захорониться в древней террасе реки. Тем самым П.И. Кротов отрицает ледниковое происхождение данных отложений.

В начале XX в. опубликована работа Б.К. Лихарева, посвященная непосредственно разрезам мезозойских отложений долин р. Колвы в районе вышеупомянутых деревень. Приводится краткое описание разреза сверху вниз:

- а) желтые пески, переслаивающиеся с галечниками, мощность 5 м;
- б) буроватая с красными полосами и крапинками слоистая глина, толщина 5 м;
- в) серая песчаная глина, неслоистая, с красными железистыми налетами на плоскостях отдельности, мощность двух последних слоев 10 м.

В слое «с» встречается черная вязкая глина и глыбы железистого песчаника.

В железистом песчанике встречены: пелециподы *Lyonsia alduni* (Fisch.), *Pecten cf. demissus* (Bean.),



*P. sp. indet.*, *Astarte sp. indet.*; аммониты *Cadoceras sp. indet.*; белемниты *Cylindroteuthis cf. spicularis* (Phill.), *C. cf. magnificus* (d'Orb.), *C. cf. absolutus* (Fisch.), *C. cf. obeliscoides* (Pavl.), *C. sp. indet.*, *Belemnites ex gr. mosquensis* (Pavl.). Выход мезозойских пород он объясняет коренным залеганием юрских отложений.

Середина XX в. ознаменовалась выходом монографического труда по геологии Колво-Вишерского края коллектива экспедиции ВНИГРИ под редакцией Н.Г. Чочиа [18]. Для бассейнов рек Верхней Печоры, Колвы и Вишеры весьма характерно обилие переотложенного материала из средне-верхнеюрских отложений. В валунодержущих глинах встречается юрская морская фауна (обычно обломки ростров белемнитов, раковин аммонитов и пелиципод волжского яруса). Обнажение около д. Вильгорт является «ледниковым отторженцем», принесенным ледником с севера. Кроме того, в ряде разрезов долины р. Колвы обнаружена пыльца юрских растений в флювиогляциальных отложениях.

В обзорной работе П.П. Генералова [19], написанной в результате исследований по геологии новейших

отложений Северного Урала и прилегающей части Русской и Западно-Сибирской равнин, проведенных автором в 1960–1965 гг., подробно задокументированы и описаны выходы подобных «отторженцев» в обнажениях по берегам рек.

По результатам структурного и поискового бурения в конце XX – начале XXI вв. в ряде скважин, пробуренных в четвертичных отложениях, были вскрыты интервалы, представленные черной глиной с морской фауной волжского яруса верхней юры. Отдельно стоит отметить вклад детско-юношеских геологических клубов Пермского края в изучении разреза Вильгорт. Юными геологами собирались коллекции окаменелостей, которые легли в основу данной работы.

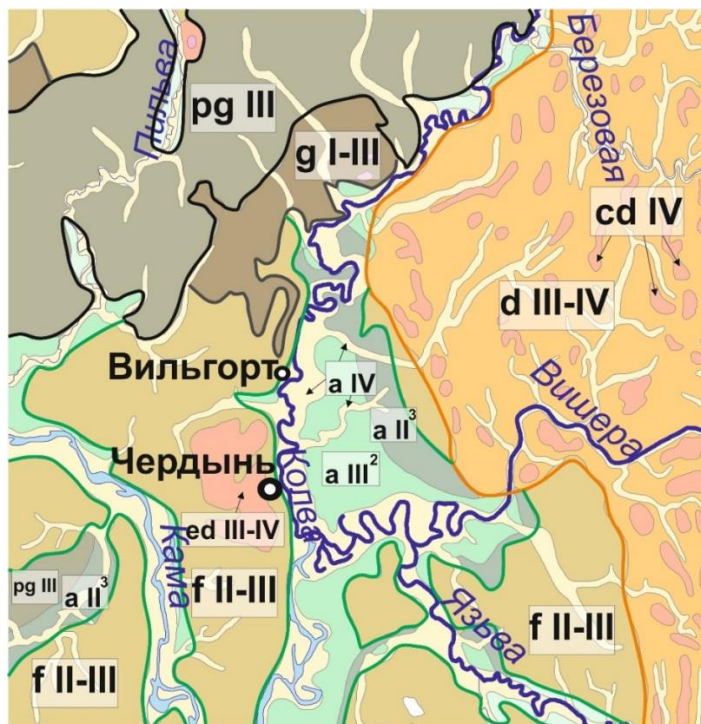
#### Краткие сведения о геологическом строении

Район исследования расположен в Чердынском районе Пермского края. Изученное обнажение вскрывается на левом берегу р. Колвы в борту уступа первой надпойменной террасы р. Колвы, притока р. Вишера, в 2,5 км северо-восточнее с. Вильгорт (рис. 2).



**Рис. 2.** Разрез Вильгорт. Зарисовка поперечного профиля разреза Вильгорт по результатам исследований предшественников [19] и полевым наблюдениям авторов настоящего исследования (1) (условные обозначения литологии – на рис. 4); цифрами в кружках показаны места отбора проб. Общий вид на разрез (2). Выходы супеси и песков с кварцевой галькой и щебнем, слои 12–14 (3). Выходы черных глин и аргиллитов с мезозойской фауной, эрратические отложения, с точками отбора проб (4). Берег реки Колвы у подножья разреза с точкой отбора проб у уреза воды (5)

**Fig. 2.** Vilgort section. Sketching of the transverse profile of the Vilgort section based on the results of the study of predecessors [19] and obvious observations of the authors of this study (1) (lithological designations are in Fig. 4); the numbers in the circles show the sampling sites. General view of section (2). Outcrops of sandy loam and sand with quartz pebbles and rubble, layers 12–14 (3). Outcrops of black shales and mudstones with Mesozoic fauna, erratic deposits, with sampling points (4). Bank of the Kolva river at the foot of the section, with a sampling point at the water's edge (5)



**Рис. 3.** Выкопировка карты четвертичных образований района исследования [20]. Индексами показаны генетические типы четвертичных отложений: а IV – аллювиальные отложения: галечники, гравий, пески, суглинки и глины; cd IV – коллювиально-делювиальные отложения: суглинки с глыбами и щебнем скальных пород, щебнистый мелкозём, щебнево-глыбовые осыпи; d III–IV – делювиальные отложения: глины и суглинки с дресвой, щебнем и глыбами; ed III–IV – элювиально-делювиальные отложения: глины и суглинки с дресвой, щебнем и глыбами подстилающих пород; pg III – полигенетические отложения: суглинки, супеси лёссовидные с тонкими прослоями песков, иногда с прослоями погребённых почв; а III<sup>2</sup> – аллювиальные отложения, вторая надпойменная терраса: галечник, гравий, пески, супеси, суглинки, глины; а II<sup>3</sup> – аллювиальные отложения, третья надпойменная терраса: галечник, гравий, пески, супеси, суглинки, глины; f II–III – флювиогляциальные отложения: окатанные валуны, галечники, гравий, пески косо- и диагонально-слоистые; g I–III – ледниковые отложения: валуны, галечники, гравий, щебень, супеси, комковатые суглинки с переотложенным материалом различного происхождения

**Fig. 3.** Copy of a map of Quaternary formations in the study area [20]. Indexes show the genetic types of Quaternary deposits: а IV – alluvial deposits: pebbles, gravel, sands, loams and clays; cd IV – colluvial-deluvial deposits: loams with blocks and rubble of rocks, rubble fine earth, rubble-block talus; d III–IV – deluvial deposits: clays and loams with gruss, crushed stone and blocks; ed III–IV – eluvial-deluvial deposits: clays and loams with gruss, crushed stone and blocks of underlying rocks; pg III – polygenetic deposits: loams, loess-like sandy loams with thin interlayers of sands, sometimes with interlayers of buried soils; а III<sup>2</sup> – alluvial deposits, the second terrace above the floodplain: pebbles, gravel, sands, sandy loams, loams, clays; а II<sup>3</sup> – alluvial deposits, the third terrace above the floodplain: pebbles, gravel, sands, sandy loams, loams, clays; f II–III – fluvioglacial deposits: rounded boulders, pebbles, gravel, sands obliquely and diagonally layered; g I–III – glacial deposits: boulders, pebbles, gravel, crushed stone, sandy loam, cloddy loam with redeposited material of various origins

В тектоническом плане Вильгортский участок приурочен к северной оконечности Соликамской депрессии. Поверхность кристаллического фундамента здесь залегает на глубине 4,1–4,3 км с моноклиальным наклоном в восточном направлении. На нем с перерывом и несогласно залегают отложения верхнего протерозоя и верхнего палеозоя. Палеозойский комплекс в составе среднего и верхнего отделов девонской системы, каменноугольной системы и нижнего отдела пермской системы сложен преимущественно карбонатными породами. Рыхлые четвертичные отложения кайнозоя мощностью 2–57 м залегают непосредственно на карбонатно-терригенных породах уфимского яруса нижней перми либо ниже, на ангидритах и доломитах кунгурского яруса в переуглублениях палеорельефа.

Строение, генетические типы и состав рыхлых четвертичных отложений на площади весьма разнообразны, в чём можно убедиться по фрагменту карты четвертичных отложений Пермского края (рис. 3).

Основной объект исследования – Вильгортское обнажение – находится в сочленении аллювиальных отложений голоцена, ледниковых пород морены среднеплейстоценового возраста, подстилающих озёрно-ледниковые образования среднего плейстоцена.

Современный аллювий (а IV) представлен галечником, гравием, песками, суглинками и глинами русла и левобережной поймы р. Колвы. Ширина поймы достигает 1,5 км. В низовьях Колвы, вплоть до слияния её с р. Вишерой, на левобережье развиты древние переуглубления палеорусел, заполненные аллювием средне- и позднелепистоценового возраста (пески,







7. Глины темно-серые с обломками светло-серого угловатого известняка и раковин, с включениями глауконита. Тип отложений – эрратические. Мощность 0,9 м.
8. Глины серые, с песчанистыми прослойками, ожелезненные, с крупной кварцитовой галькой. Морена, отложения ледниковые. Возраст: днепровский горизонт среднего плейстоцена (QII<sub>dn</sub>). Мощность 0,8 м.
9. Глины темно-серые с обломками почти чёрного песчаника, светло-серого угловатого известняка и раковин. Тип отложений – эрратические. Возраст позднеюрский-раннемеловой. Мощность 0,6 м.
10. Глина серая песчаная, неслоистая, с редкой галькой, в кровле буроватая с красными полосами, слоистая. Морена, отложения ледниковые. Мощность 0,9 м.
11. Песок желтовато-серый, разнотерный с гравием и галькой в подошве, аллювиальный. Мощность 2,4 м.
12. Пески буровато-серые, глинистые, со щебнем и галькой кварцевых пород, элювиально-делювиальные. Мощность 1,0 м.
13. Супесь буровато-серая, грубая, рыхлая с галькой и гнездами бурых глин, элювиально-делювиальная. Мощность 1,0 м.
14. Супесь бурая, элювиально-делювиальная. Мощность 0,5 м.

Общая мощность четвертичных отложений Вильгортского разреза составила 20,5 м.

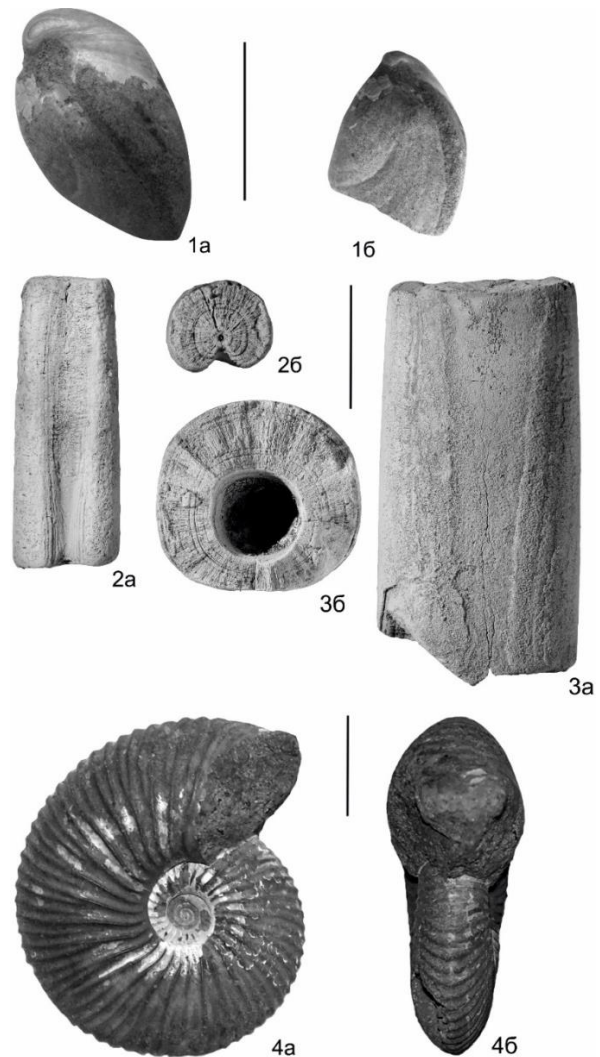
#### Результаты макропалеонтологического анализа

В обнажении и в осыпи были обнаружены роостры белемнитов, фрагменты раковин пелеципод и единичные раковины аммонитов. Пелециподы представлены фрагментами раковин и единичными находками *Buchia* sp. (рис. 5, 1). Белемниты представлены многочисленными обломками роостров. Фрагменты роостров имеют различные размеры и различную сохранность. Определены: *Eulagonibelus* cf. *volgensis* (d'Orbigny) и *Lagonibelus* cf. *magnificus* (d'Orbigny) (рис. 5, 2, 3). Наличие данных видов указывает на поздневожжский возраст пород. В литературе, посвящённой данному обнажению, упоминаются виды *Cylindroteuthis* cf. *spicularis* (Phillips), *Cylindroteuthis* cf. *obeliscoides* (Pavlov), *Acroteuthis* ex gr. *mosquensis* (Pavlov). Аммониты единичны. В коллекции юных геологов «Монолита» присутствует ювенильная раковина аммонита рода *Pseudocadoceras*, по определению Рогова М.А. (рис. 5, 4).

#### Результаты микрофаунистического анализа

Обработано шесть проб, в одной из них обнаружен представительный комплекс фораминифер, в двух – единичные раковины. Установлены следующие стратиграфические подразделения.

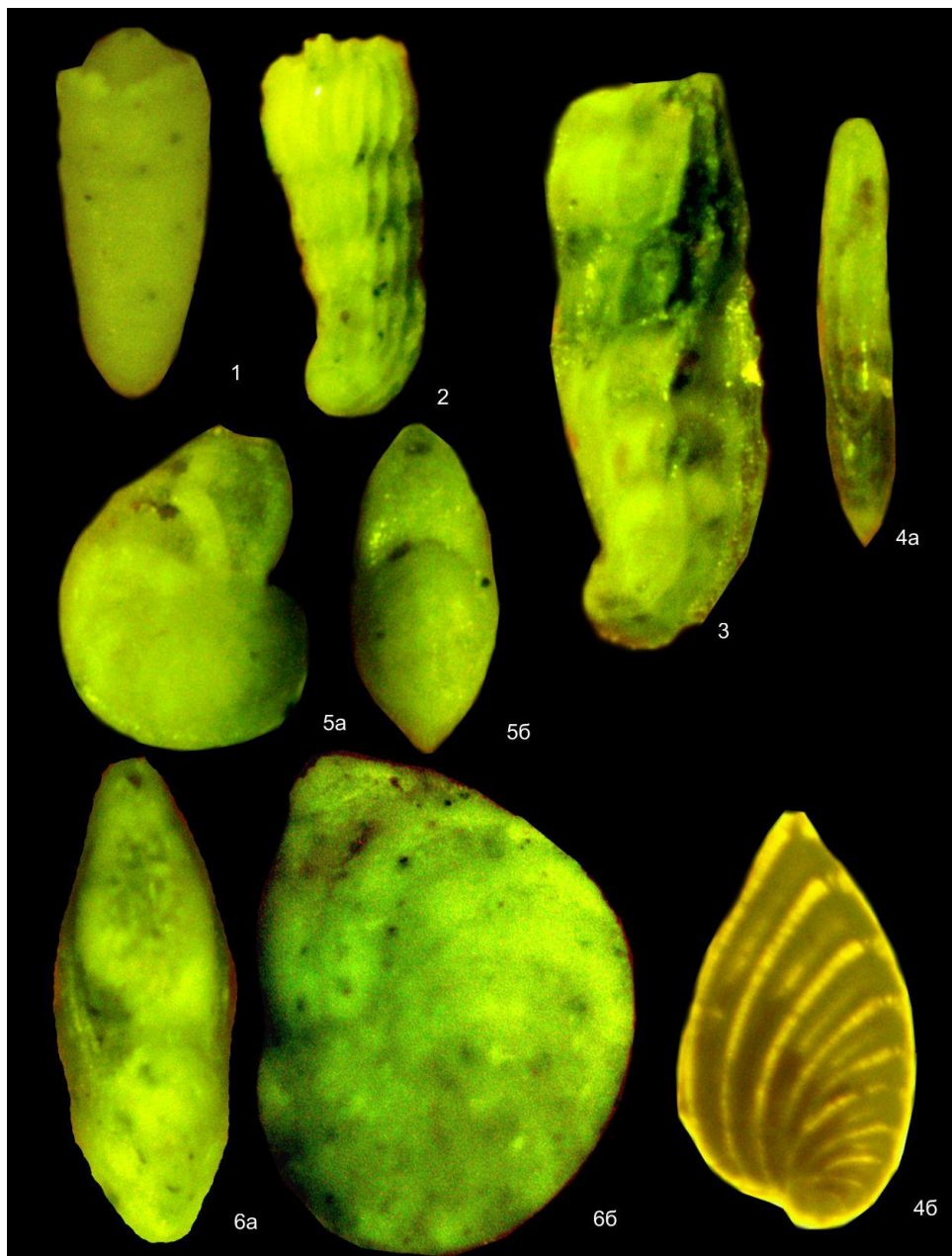
**Проба 1.** Включения. Обломки раковин пелеципод, призматического слоя иноцерамид, иглы морских ежей, роостры белемнитов, мшанки, глауконит, кварцевый гравий.



**Рис. 5.** Фототаблица макрофауны разреза Вильгорт: 1. *Buchia* sp.; 2. *Eulagonibelus* cf. *volgensis* (d'Orbigny): а – с вентральной стороны; б – поперечное сечение; 3. *Lagonibelus* cf. *magnificus* (d'Orbigny): а – с вентральной стороны; б – поперечное сечение; 4. *Pseudocadoceras* sp.: а – с латеральной стороны, б – со стороны устья. Длина масштабной линейки 10 мм

**Fig. 5.** Phototable of the macrofauna of the Vilgort section: 1. *Astarte* sp.; 2. *Eulagonibelus* cf. *volgensis* (d'Orbigny): а – from the ventral side; б – cross section; 3. *Lagonibelus* cf. *magnificus* (d'Orbigny): а – from the ventral side; б – cross section; 4. *Pseudocadoceras* sp.: а – from the lateral side, б – from the mouth. The length of the scale bar is 10 mm

Определены следующие виды фораминифер: *Haplophragmoides* sp. ind., *Ammoscalaria* sp. ind., *Recurvoides* ex gr. *praeobskiensis* Bulynnikova, *Bulbobaculites* ex gr. *elongatus* Dain, *Pseudonodosaria* cf. *tutkowskii* (Mjatl.), *Lenticulina* aff. *wega* K. Kuzn., *Lenticulina* *panderosa* (Mjatl.), *Lenticulina* *dofleini* (Kasanev), *Marginulina* *srtiatocostata* Reuss, *Marginulina* cf. *improria* Bassov, *Marginulina* cf. *formosa* Bassov, *Planularia* cf. *pressula* Schleifer, *Saracenaria* ex gr. *pravoslavlevi* Furss. et Polenova, *Epistomina* sp. ind.



**Рис. 6.** Фототаблица микрофауны разреза Вильгорт: 1. *Pseudonodosaria cf. tutkowskii* (Mjatl.). x60. Экз. Вильгорт-1/1; вид с боку; средний волжский подъярус, зона по фораминиферам *Spiroplectammina vicinalis*, *Dorothia tortuosa*; 2. *Marginulina srtiatocostata* Reuss. x60. Экз. Вильгорт-1/2; вид с боку; там же; 3. *Marginulina cf. improria* Bassov. x60. Экз. Вильгорт-1/3; вид сбоку; средний волжский подъярус, зона по фораминиферам *Spiroplectammina vicinalis*, *Dorothia tortuosa*; 4. *Planularia cf. pressula* Schleifer. x80. Экз. Вильгорт-1/4: а – вид с устьевой поверхности, б – вид сбоку; средний волжский подъярус, зона по фораминиферам *Spiroplectammina vicinalis*, *Dorothia tortuosa*; 5. *Lenticulina panderosa* (Mjatl.). x80. Экз. Вильгорт-1/5: а – вид с устьевой поверхности, б – вид сбоку; там же; 6. *Lenticulina dofleini* (Kasanzev). x50. Экз. Вильгорт-1/6: а – вид с устьевой поверхности, б – вид сбоку; средний волжский подъярус, зона по фораминиферам *Spiroplectammina vicinalis*, *Dorothia tortuosa*. Все изображения, кроме 4, б, сфотографированы в отраженном свете. Изображение 4, б сфотографировано в проходящем свете

**Fig. 6.** Phototable of the microfauna of the Vilgort section: 1. *Pseudonodosaria cf. tutkowskii* (Mjatl.). x60. Ex. Vilgort-1/1; side view; Middle Volgian Substage, zone after foraminifers *Spiroplectammina vicinalis*, *Dorothia tortuosa*; 2. *Marginulina srtiatocostata* Reuss. x60. Ex. Vilgort-1/2; side view; there; 3. *Marginulina cf. improria* Bassov. x60. Ex. Vilgort-1/3; side view; Middle Volgian Substage, zone after foraminifers *Spiroplectammina vicinalis*, *Dorothia tortuosa*; 4. *Planularia cf. Pressula* Schleifer. x80. Ex. Vilgort-1/4: a – view from the mouth surface, b – side view; Middle Volgian Substage, zone after foraminifers *Spiroplectammina vicinalis*, *Dorothia tortuosa*; 5. *Lenticulina panderosa* (Mjatl.). x80. Ex. Vilgort-1/5: a – view from the mouth surface, b – side view; there; 6. *Lenticulina dofleini* (Kasanzev). x50. Ex. Vilgort-1/6: a – view from the mouth surface, b – side view; Middle Volgian Substage, zone after foraminifers *Spiroplectammina vicinalis*, *Dorothia tortuosa*. All images, except 4, b, are photographed in reflected light. Image 4, b is photographed in transmitted light

В составе комплекса характерные формы зоны по фораминиферам *Astacolus aquilonicus*-*Lenticulina kassini* средневолжского подъяруса Русской платформы, а также зоны *Spiroplectammina vicinalis*, *Dorothia tortuosa* волжского яруса Западной Сибири.

**Проба 2.** Включения. Кварцевый гравий, глауконит, обломки игл морских ежей, неуглефицированный растительный детрит. Фораминиферы не обнаружены.

**Проба 3.** Включения. Глауконит, обломки раковин пелеципод, зубы рыб.

Определены следующие виды фораминифер: *Ammodiscus ex gr. veteranus* Kosyreva, *Cribrostomoides umbonatus* (Romanova), *Evolutinella mutabilis* (Bulynnikova), *Recurvoides romanovae* Putrja.

Фораминиферы относятся к комплексу с *Recurvoides romanovae* [16], который распространен в интервале рязанского яруса, за исключением самого основания (зоны *Chetaites sibiricus*) и кровли (зоны *Tollia tolli*).

**Проба 4.** Включения. Обломки раковин пелеципод, призматического слоя иноцерамид, глауконит, латериты, гипс, обломки раковин фораминифер верхнемелового облика, части игл морских ежей, ростров белемнитов, кварцевый гравий.

Определены следующие виды фораминифер: *Ammodiscus zaspelovae* Kosyreva, *Glomospirella ex gr. galinae* Scharovskaja, *Cribrostomoides ex gr. umbonatus* (Romanova), *Recurvoides sp. ind.*

Стратиграфическое распространение единственного определенного в бинарной номенклатуре вида *Ammodiscus zaspelovae* Kosyreva охватывает средний и верхний подъярусы волжского яруса. Находки раковин плохой сохранности видов *Glomospirella ex gr. galinae*, *Cribrostomoides ex gr. umbonatus* этому заключению не противоречат.

**Проба 5.** Включения. Обломки раковин пелеципод, кварцевый гравий, обломки раковин фораминифер

верхнемелового облика. Определимые фораминиферы не обнаружены.

**Проба 6.** Включения. Обломки раковин пелеципод, фосфоритовые конкреции, кварцевый гравий, обломки магматических и метаморфических пород, лимонит, оолиты, пирит, глауконит, неуглефицированный растительный детрит, раковины мелких гастропод. Определимые фораминиферы не обнаружены.

#### Заключение

В результате исследования авторами приведено детальное описание и стратиграфическое расчленение разреза Вильгорт. На пермских карбонатных отложениях со стратиграфическим перерывом залегают элювиально-делювиальные образования лихвинского горизонта, которые перекрываются сначала озерно-ледниковыми, а затем ледниковыми отложениями днепровского горизонта среднего плейстоцена с эрратическими глыбами мезозойских, многократно перетолженных терригенных пород. В связи с неотектонической активностью правобережной блоковой части Вильгортского участка, испытавшей в позднем плейстоцене воздымание, большинство верхнеплейстоценовых отложений претерпело размыв, чем и объясняется стратиграфическое несогласие, когда современные отложения залегают на ледниковых породах среднего плейстоцена.

По результатам микропалеонтологических исследований впервые обнаружены фораминиферы в пятом слое. Установлены комплексы фораминифер средневолжского подъяруса верхней юры (проба 1); рязанского яруса нижнего мела (проба 3); и среднего и верхнего подъяруса волжского яруса (проба 4).

Таким образом, результаты исследования позволяют полагать, что эрратические глыбы были многократно перетолжены и не сохранили в себе стратиграфической последовательности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рухина Е.В. Литология ледниковых отложений. – М.: Недра, 1973. – 176 с.
2. Лидер В.А. Четвертичные отложения Урала. – М.: Недра, 1976. – 137 с.
3. Астахов В.И. Четвертичная геология суши. – СПб.: СПбГУ, 2020. – 440 с.
4. The Middle Pleistocene glacial evolution of northern East Anglia, UK: a dynamic tectonostratigraphic-parasequence approach / J.R. Lee, E. Phillips, J. Rose, D. Vaughan-Hirsch // Journal of Quaternary Science. Special Issue: The Quaternary of the North Sea basin. – 2017. – V. 32. – P. 231–260.
5. Quaternary Stratigraphic Division and Paleoenvironmental Evolution Observed from Core LZK1 on Hengsha Island, Shanghai / X. Ke, J. Xie, Z. Zhang, Y. Zou, G. Wang // Acta Geologica Sinica. Special Issue: Honor of Professor LI Tingdong's 90th Birthday. – 2020. – V. 94. – P. 1167–1177.
6. Murray H., Robertson A.H. Pliocene–Pleistocene sedimentary and geomorphologic development of the Vasilikos river catchment, S Cyprus, in relation to uplift of the Troodos ophiolite and climate-related changes // Geological Magazine. – 2019. – V. 157. – P. 573–602.
7. Singh S., Kaul M.N. Quaternary Glacial History of Naradu Valley, Kinnar Himalaya, Himachal Pradesh // International journal of sciences. – 2017. – V. 3. – P. 1–7.
8. Wided S., Jalila S., Kamel R. Sedimentology and high-frequency cycles of the late Pleistocene of the Bizerte area (N-E Tunisia) // Arabian Journal of Geosciences. – 2019. – V. 12. – P. 636–650.
9. Novak A., Popit T., Šmuc A. Sedimentological and geomorphological characteristics of Quaternary deposits in the Planica-Tamar Valley in the Julian Alps (NW Slovenia) // Journal of Maps. – 2019. – V. 14. – P. 382–391.
10. Novak A., Oštir K. Towards better visualisation of alpine quaternary landform features on high-resolution digital elevation models // Remote Sensing. – 2021. – V. 13. – P. 4211–4233.
11. Astakhov V., Pestova L., Shkatova V. Loessoids of Russia: varieties and distribution // Quaternary International. – 2021. – V. 620. – P. 24–35.
12. Митта В.В. Унифицированная региональная стратиграфическая схема юрских отложений Восточно-Европейской платформы. – М.: Палеонтол. ин-т им. А.А. Борисака, 2012. – 78 с.
13. К проблеме картографирования северного плейстоцена / В.И. Астахов, Д.В. Назаров, Л.Р. Семенова, М.А. Спиридонов, В.К. Шкатова // Региональная геология и металлогения. – 2015. – № 62. – С. 20–33.
14. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1000000 (новая серия). Лист Р-40, 41. Объяснительная записка. – СПб.: ВСЕГЕИ, 1995. – 240 с.
15. Густомесов В.А. Позднеюрские бореальные белемниты (*Cylindroteuthinae*) Русской платформы // Тр. ГИН АН СССР. – 1964. – № 107. – С. 89–216.

16. Marinov V.A., Zakharov V.A. Foraminiferal zones of the boreal Berriasian, Valanginian, and lower Hauterivian in northern Siberia (relatively deep sea facies) // *Stratigraphy and Geological Correlation*. – 2001. – V. 9. – № 1. – P. 43–64.
17. Кротов П.И. Следы ледникового периода в северо-восточной части Европейской части России и на Урале // *Труды общества естествознания при Казанском университете*. – 1885. – Т. XIV. – № 4. – 51 с.
18. Чочиа Н.Г. Геологическое строение Колво-Вишерского края. – Л.: Госгеолтехиздат, 1955. – 407 с.
19. Генералов П.П. Разрез позднего кайнозоя Колво-Вишерского и Верхнепечорского бассейнов // *Вопросы стратиграфии и корреляции плиоценовых отложений северных и южных частей Предуралья*. – 1972. – № 2. – С. 77–103.
20. Атлас Пермского края / под ред. С.А. Бузмакова и др. – Пермь: ПГНИУ, 2012. – 124 с.
21. Назаров Н.Н., Копытов С.В. История перестройки русловых систем Камско-Кельминской низменности в позднем плейстоцене–голоцене // *Географический вестник*. – 2020. – № 4. – С. 6–17.

Поступила: 22.11.2022 г.

Прошла рецензирование: 08.12.2022 г.

#### Информация об авторах

**Плюснин А.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, начальник отдела минералогических исследований, Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми; старший научный сотрудник лаборатории седиментологии и эволюции палеобиосферы Тюменского Государственного университета.

**Сулима А.И.**, соискатель кафедры региональной и нефтегазовой геологии Пермского государственного национального исследовательского университета.

**Маринов В.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории седиментологии и эволюции палеобиосферы Тюменского Государственного университета.

**Вдовиченко С.Е.**, студент кафедры палеонтологии геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

**Самодуров С.А.**, педагог дополнительного образования, Березниковская юношеская геологическая партия, Березниковский Дом детского и юношеского туризма и экскурсий.

UDC 551.79:569.32:571.54

## RESULTS OF STUDYING THE PLEISTOCENE IN THE VILGORT SECTION (CHERDYN DISTRICT, PERM TERRITORY)

**Aleksey V. Plyusnin<sup>1,2</sup>,**  
a.v.plyusnin@mail.ru

**Aleksandr I. Sulima<sup>3</sup>,**  
super.sulima2013@yandex.ru

**Vladimir A. Marinov<sup>2</sup>,**  
marinovva@mail.ru

**Stepan E. Vdovichenko<sup>4</sup>,**  
vdovichenko.stepan2001@yandex.ru

**Sergey A. Samodurov<sup>5</sup>,**  
samodurov.sergej@yandex.ru

<sup>1</sup> PermNIPIneft Branch of LUKOIL-Engineering LLC in Perm,  
29, Sovetskoy Armii street, Perm, 614000, Russia.

<sup>2</sup> Tyumen State University,  
23, Lenin street, Tyumen, 625003, Russia.

<sup>3</sup> Perm State National Research University,  
15, Bukirev street, Perm, 614000, Russia.

<sup>4</sup> M.V. Lomonosov Moscow State University,  
1, Leninskie Gory street, Moscow, 119991, Russia.

<sup>5</sup> Berezniki House of Children's and Youth Tourism and Excursions,  
7, Bolshevik passage street, Berezniki, 618400, Russia.

**The relevance.** The study of glacial deposits, which is one of the main components of most continental sedimentary formations of all ages, makes it possible to identify the features of its structure and formation, as well as to establish the facies-genetic confinement. This is especially true for Quaternary geology, since makes it possible to carry out stratigraphic comparisons and identify paleogeographic settings for the formation of deposits. This paper presents the results of a comprehensive lithological and biostratigraphic study of the Vilgort section of the Kolva river valley, Cherdyn district of the Perm Territory.

**The main aim** of the research is to study the geological section and substantiation of the age of the Mesozoic deposits according to the fauna complex.

**Objects:** continental deposits of the Middle Pleistocene, exposed in the right side of the river Kolva. The deposits of this region are poorly studied. References are shown in the literature about the Mesozoic fauna found in the Vilgort section.

**Methods:** geomapping, layered lithological description, layer-by-layer sampling, biostratigraphic studies.

**Results.** These studies made it possible to carry out a detailed layer-by-layer description and stratigraphic subdivision of the Vilgort section. The Permian carbonate deposits are overlain by eluvial-deluvial deposits of the Likhvin horizon, they are overlain first by lacustrine-glacial, and then by glacial deposits of the Dnieper horizon of the middle Pleistocene with erratic blocks of Mesozoic repeatedly redeposited terrigenous rocks. Due to the neotectonic activity of the right-bank block part of the Vilgort area, which underwent uplift in the Late Pleistocene, most of the Upper Pleistocene deposits were eroded, which explains the stratigraphic unconformity, when modern deposits lie on glacial deposits of the Middle Pleistocene. According to the results of micropaleontological studies, foraminifers were identified from samples taken in the fifth layer: the Middle Volgian substage of the Volgian stage (sample 1); distributed in the interval of the Ryazanian Stage of the Lower Cretaceous (sample 3) and the middle and upper substages of the Volgian Stage (sample 4).

### Key words:

Dnieper horizon, middle Pleistocene, Quaternary system, glacial deposits, Vilgort, Cherdyn district, Perm region.

### REFERENCES

1. Rukhina E.V. *Litologiya lednikovyykh otlozheniy* [Lithology of glacial deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1973. 176 p.
2. Lider V.A. *Chetvertichnye otlozheniya Urala* [Quaternary deposits of the Urals]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 137 p.
3. Astakhov V.I. *Chetvertichnaya geologiya sushii* [Quaternary land geology]. St-Petersburg, SPBGU Publ., 2020. 440 p.
4. Lee J.R., Phillips E., Rose J., Vaughan-Hirsch D. The Middle Pleistocene glacial evolution of northern East Anglia, UK: a dynamic tectonostratigraphic-parasequence approach. *Journal of Quaternary Science, Special Issue: The Quaternary of the North Sea basin*, 2017, vol. 32, pp. 231–260.
5. Ke X., Xie J., Zhang Z., Zou Y., Wang G. Quaternary Stratigraphic Division and Paleoenvironmental Evolution Observed from Core LZK1 on Hengsha Island, Shanghai. *Acta Geologica Sinica. Special Issue: Honor of Professor LI Tingdong's 90th Birthday*, 2020, vol. 94, pp. 1167–1177.
6. Murray H., Robertson A.H. Pliocene–Pleistocene sedimentary and geomorphologic development of the Vasilikos river catchment, S Cyprus, in relation to uplift of the Troodos ophiolite and climate-related changes. *Geological Magazine*, 2019, vol. 157, pp. 573–602.



7. Singh S., Kaul M.N. Quaternary Glacial History of Naradu Valley, Kinnar Himalaya, Himachal. *International journal of sciences*, 2017, vol. 3, pp. 1–7.
8. Wided S., Jalila S., Kamel R. Sedimentology and high-frequency cycles of the late Pleistocene of the Bizerte area (N-E Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 2019, vol. 12, pp. 636–650.
9. Novak A., Popit T., Šmuc A. Sedimentological and geomorphological characteristics of Quaternary deposits in the Planica-Tamar Valley in the Julian Alps (NW Slovenia). *Journal of Maps*, 2019, vol. 14, pp. 382–391.
10. Novak A., Oštir K. Towards better visualisation of alpine quaternary landform features on high-resolution digital elevation models. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, pp. 4211–4233.
11. Astakhov V., Pestova L., Shkatova V. Loessoids of Russia: varieties and distribution. *Quaternary International*, 2021, vol. 620, pp. 24–35.
12. Mitta V.V. *Unifitsirovannaya regionalnaya stratigraficheskaya skhema yurskikh otlozheniy Vostochno-Evropetskoy platformy* [Unified Regional Stratigraphic Scheme of the Jurassic of the East European Platform]. Moscow, Paleontol. Inst. im. A.A. Borisyaka Publ., 2012. 78 p.
13. Astakhov V.I., Nazarov D.V., Semenova L.R., Spiridonov M.A., Shkatova V.K. On the problem of mapping the northern Pleistocene. *Regional geology and metallogeny*, 2015, no. 62, pp. 20–33. In Rus.
14. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. 1:1000000 (novaya seriya). List R-40, 41. Obyasnitelnaya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. 1:1 000 000 (new series). Sheet R-40, 41. Explanatory note]. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 1995. 240 p.
15. Gustomesov V.A. Pozdneuyurskie borealnye belemnity (Cylindroteuthinae) Russkoy platformy [Late Jurassic boreal belemnites (Cylindroteuthinae) of the Russian Platform]. *Trudy GIN RAN SSSR*, 1964, no. 107, pp. 89–216.
16. Marinov V.A., Zakharov V.A. Foraminiferal zones of the boreal Berriasian, Valanginian, and lower Hauterivian in northern Siberia (relatively deep sea facies). *Stratigraphy and Geological Correlation*, 2001, vol. 9, no. 1, pp. 43–64.
17. Krotov P.I. Sledy lednikovogo perioda v severo-vostochnoy chasti Evropeyskoy chasti Rossii n na Urale [Traces of the ice age in the north-eastern part of the European part of Russia in the Urals]. *Trudy obshchestva estestvoznaniya pri Kazanskom universitete*, 1885, vol. XIV, no. 4, 51 p.
18. Chochia N.G. *Geologicheskoe stroenie Kolvo-Visherskogo kraya* [Geological structure of the Kolvo-Vishera region]. Leningrad, Gosgeoltekhizdat Publ., 1955. 407 p.
19. Generalov P.P. Razrez pozdnego kaynozoya Kolvo-Visherskogo i Verkhnepechorskogo basseynov [Cenozoic section of the Kolva-Vishera and Upper Pechora basins]. *Voprosy stratigrafii i korrelyatsii pliotseynovykh otlozheniy severnykh i yuzhnykh chastey Preduralya*, 1972, no. 2, pp. 77–103.
20. *Atlas Permskogo kraya* [Atlas of the Perm Territory]. Ed. by S.A. Buzmakov. Perm, PGNIU Publ., 2012. 124 p.
21. Nazarov N.N., Kopytov S.V. History of the channel systems reorganization in the Kama-Keltma lowland in the Late Pleistocene. *Holocene. Geographical bulletin*, 2020, no. 4, pp. 6–17. In Rus.

Received: 22 November 2022.

Reviewed: 8 December 2022.

#### Information about the authors

**Aleksey V. Plyusnin**, head of the Mineralogical Research Department, PermNIPIneft Branch of LUKOIL-Engineering LLC in Perm; Cand. Sc., researcher, Tyumen State University.

**Aleksandr I. Sulima**, applicant, Perm State National Research University.

**Vladimir A. Marinov**, Cand. Sc., researcher, Tyumen State University.

**Stepan E. Vdovichenko**, student, M.V. Lomonosov Moscow State University.

**Sergey A. Samodurov**, teacher of additional education, Berezniki House of Children's and Youth Tourism and Excursions.



УДК 662.71

## ЗАЖИГАНИЕ ЧАСТИЦ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ В УСЛОВИЯХ СВЧ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОМ НАГРЕВЕ

Сыродой Семен Владимирович<sup>1</sup>,  
ssyrodoy@yandex.ru

Малышев Дмитрий Юрьевич<sup>1</sup>,  
dmitry.mlv@gmail.com

Косторева Жанна Андреевна<sup>1</sup>,  
zhanna.kostoreva@yandex.ru

Косторева Анастасия Андреевна<sup>2</sup>,  
nastia.kostoreva@yandex.ru

Омаров Азимхан Адилханович<sup>1</sup>,  
aao35@tpu.ru

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

<sup>2</sup> ОА ТомскРТС,  
Россия, 634050, г. Томск, пер. Нахановича, 4а.

**Актуальность.** Несмотря на активное развитие технологий производства электрической энергии по средствам ветро-электрогенераторов и солнечных батарей, к 2100 г. все равно большая часть энергии будет вырабатываться на тепловых электрических станциях, сжигающих органическое топливо. Как правило, тепловые электрические станции в качестве топлива используют уголь (около 40 %). Однако стоит отметить, что в процессе сжигания угля в топках паровых и водогрейных котлов интенсивно формируются токсичные оксиды серы и азота. В связи с этим многими учёными мира, работающими в области энергетики, ведутся работы по созданию новых инновационных технологий по эколого- и энергоэффективному производству тепловой и электрической энергии. К последним относятся технологии сжигания древесной биомассы в топках паровых и водогрейных котлов тепловых электрических станций. Использование древесной биомассы позволяет существенно снизить экологическую нагрузку тепловых электрических станций на атмосферу. Однако до настоящего времени еще не создано технологий, позволяющих сжигать древесину с высокой энергоэффективностью. Последнее обусловлено высокой влагонасыщенностью древесной биомассы в ее исходном состоянии.

**Цель:** экспериментальное установление основных этапов и выделение комплекса физико-химических процессов, протекающих совместно в период воспламенения частиц древесной биомассы в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве.

**Объект:** сухая и насыщенная влагой древесина двух видов (сосна и кедр). Относительная влажность древесины, из которой выполнены частицы (с характерным размером 4 мм), варьировалась от 6 (относительно сухая биомасса) до 42 % (влагонасыщенная древесина).

**Метод.** Для установления основных характеристик процесса воспламенения частицы древесины в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве разработан специальный экспериментальный стенд, представляющий реакционную трубу с теплоизолированными радиопрозрачными стенками, сквозь которую продувался высокотемпературный окислитель (кислород воздуха). Частица древесины устанавливалась на оси трубы так, чтобы попадать в фокус излучателя. Все процессы регистрировались высокоскоростной видеокамерой.

**Результаты.** Приведены результаты экспериментальных исследований процессов зажигания сухих и влажных частиц древесной биомассы в среде нагретого до высоких температур воздуха в условиях радиационно-конвективного и радиационно-конвективно-микроволнового нагревов, выполненных с целью обоснования ресурсоэффективности использования в теплоэнергетике древесной биомассы (как базового топлива паровых и водогрейных котлов). Установлено существенное влияние вида древесины на времена задержки зажигания ( $t_{ign}$ ). Также показано достаточно значимое влияние условий нагрева на процессы воспламенения. Так, микроволновое воздействие приводит к ускорению процесса зажигания частиц древесной биомассы. При этом показано, что при воспламенении влажных частиц древесины эффект от воздействия СВЧ-излучения (ускорения зажигания) более значителен по сравнению с процессом зажигания сухих древесных частиц. Также установлено, что влажность ( $\varphi$ ) древесной биомассы существенно влияет на значения времен задержки зажигания (увеличение  $\varphi$  приводит к росту значения  $t_{ign}$ ). Установленные в проведенных экспериментах закономерности иллюстрируют перспективности использования в теплоэнергетике древесной биомассы (в том числе и влагонасыщенной) как основного топлива.

### Ключевые слова:

Древесная биомасса, инициация горения, время термической подготовки, индукция, СВЧ-нагрев.

### Введение

Глобальный переход от традиционной (угольной, газовой и атомной) энергетики к нетрадиционным

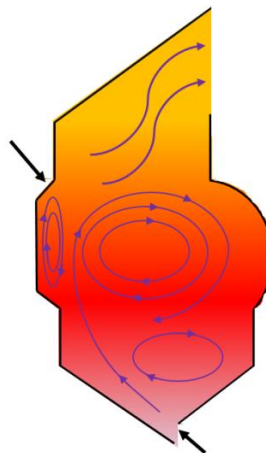
возобновляемым источникам энергии (ветрогенераторы и солнечные электростанции), проводимый в Европейском союзе в последние десятилетия (около

30 лет) [1], показал, что выбранная ЕС программа развития энергетического сектора ошибочна. Последнее обусловлено отсутствием в настоящее время мощных накопителей электрической энергии [2, 3]. В результате возможность использования вырабатываемой ветрогенераторами и солнечными электростанциями энергии существенно ограничена. Это связано с тем, что до настоящего времени не создано эффективных систем хранения электрической энергии [4, 5]. Поэтому вывод из эксплуатации угольных и атомных электростанций приводит к значительному снижению экономического роста в Западной Европе [6]. В этой связи особую значимость приобретает древесная биомасса, которая является перспективным возобновляемым (в относительно короткий период времени) энергоносителем. При этом в качестве топлива могут использоваться как типичные отходы лесоперерабатывающего комплекса (опилки) или сельского хозяйства (солома, скорлупа, навоз и др.) [7, 8], так и специально выращенная «энергетическая» древесина [9]. При сжигании древесной биомассы образуется диоксид углерода, но он не нарушает баланса диоксида углерода в атмосфере [10]. Также по результатам экспериментов [11, 12] установлено, что при горении древесины образуется значительно меньше оксидов азота и серы по сравнению с горением угля [13–15].

Но к настоящему времени древесная биомасса достаточно мало используется в тепло- и электрогенерации. Последнее связано с тем, что разработка технологии эффективного сжигания биомассы в топках паровых и водогрейных котлов достаточно сложная задача, решение которой в общем виде пока не получено. Так, например, доля котельного оборудования, сжигающего биомассу (в том числе и как добавку к угля), в мире не превышает 10 % [16]. Это обусловлено в первую очередь высокой влагонасыщенностью древесины в ее исходном (после валки дерева) состоянии [17]. При этом известно [17], что сушка любого топлива и древесной самый энергозатратный процесс на тепловых электрических станциях (ТЭС).

Кроме этого, процедуры влагоудаления проводятся, как правило, в объемных хранилищах силосного типа [18]. Последнее существенно увеличивает капитальные затраты (на металлоконструкции непосредственно самого бункера и здания бункерного отделения ТЭС) при проектировании и строительстве ТЭС. При этом по результатам экспериментов [19] установлено, что внутрипоровая влага существенно тормозит процесс термической подготовки и зажигания частиц древесины и, соответственно, увеличивает механический недожог топлива. В этих условиях можно сказать, что проведение процедуры влагоудаления приемлемо проводить непосредственно в топочном устройстве при высокотемпературном нагреве потока частиц влажной древесной биомассы. В первую очередь для этого необходимо организовывать в топочном пространстве вихревые зоны постоянной рециркуляции топливного факела по аналогии с топками конструкции Шершнева (рис. 1) [20]. Также следует отметить, что одним из возможных вариантов улуч-

шения характеристик (уменьшение характерных времен процесса) зажигания и горения является сжигание топлива в условиях воздействия на факел топлива физических полей: электромагнитное [21, 22], заряженных частиц [23] или звуковое [24].



**Рис. 1.** Схема типичной топки Шершнева для сжигания влагонасыщенных топлив

**Fig. 1.** Scheme of a typical Shershnnev furnace for burning moisture-saturated fuels

Наиболее перспективным из таковых считается (по мнению экспертов [25]) технология сжигания высоковлажного и низкосортного топлива (к которым относится древесная биомасса) в условиях микроволнового воздействия. В результате добавления СВЧ-излучения на слой влагонасыщенного топлива в условиях интенсивного радиационно-конвективного воздействия существенно ускоряется процесс испарения воды. В результате стадия сушки (по терминологии [26]) топливной частицы существенно сокращается, и, соответственно, весь процесс термической подготовки интенсифицируется. Но до настоящего времени систематических экспериментальных и теоретических исследований влияния микроволнового воздействия при воспламенении частицы влажной древесной биомассы практически не проводилось. Поэтому целесообразны исследования с целью сопоставления в условиях такого воздействия характеристик зажигания частиц сухой и влажной древесины. По этой причине целью работы является установление по результатам экспериментов основных закономерностей процессов зажигания частиц древесной биомассы в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве.

#### Методика экспериментальных исследований

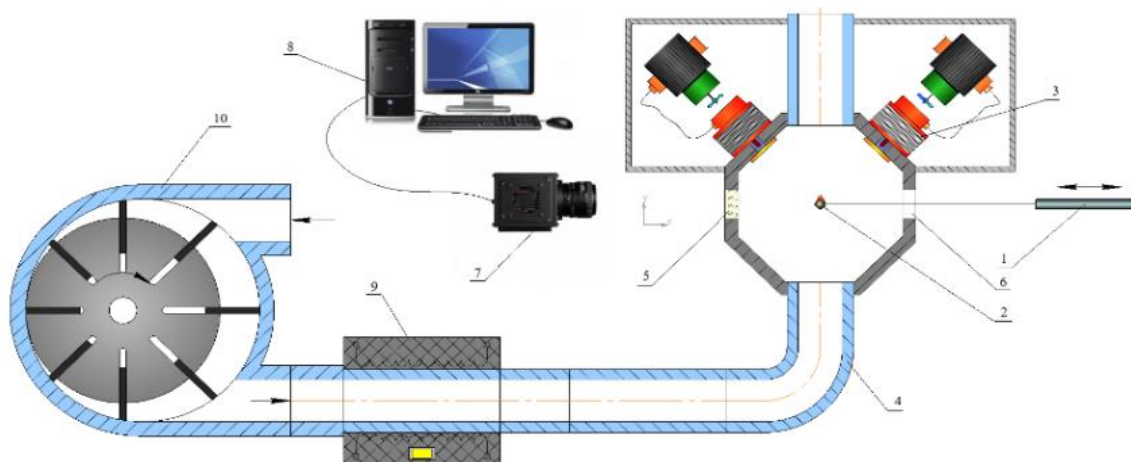
В экспериментах использовались кубические частицы (с характерным размером 4 мм) древесины (на основе кедра и сосны), вырезанные из сухого монолитного фрагмента высокоточным резакром. Погрешности определения геометрических размеров образца топлива составляли в проведенных экспериментах не более 0,1 мм. Влажность сухих частиц древесины составляла 6–7 %, увлажненных – 40–42 %. Последние значения влажности типичны для свежесрезанной

древесины [27]. На первом этапе проведения и процедуры подготовки экспериментального материала фрагмент древесины больших размеров, из которого приготавливались частицы топлива, высушивался в сушильном шкафу при температуре 100 °С до влажности  $\varphi=6-7\%$ . Далее проводилось контрольное взвешивание. На втором этапе при помощи лазерного станка вырезались частицы в форме куба с характерным размером грани  $\delta=4$  мм. После этого частицы древесины взвешивались. На третьем этапе частицы древесной биомассы выдерживались в дистиллированной воде в течение 2–3 часов. По истечении этого периода частицы взвешивались. Если влажность древесной биомассы была ниже контрольной (в пределах отклонения  $\Delta \leq 5\%$ ), то частицы выдерживались в воде дольше. Если выполнялось условие, что влажность биомассы бы-

ла больше, то частицы дополнительно высушивались. Относительная влажность влагонасыщенного топлива, которая высчитывалась по формуле:

$$\varphi = \frac{m_k - m_0}{m_k} \cdot 100\%,$$

$m_k$  – масса насыщенной влагой частицы,  $m_0$  – начальная масса частицы, составляла  $\varphi=40-42\%$ . Для установления достоверных значений времен задержки зажигания число экспериментов составляло не менее 15 в идентичных условиях нагрева. Обработка результатов проводилась с использованием современного аппарата статистической обработки результатов эксперимента. Значение случайной погрешности составляло менее 16 %. Обработка полученных результатов осуществлялась по аналогии с [28].



**Рис. 2.** Схема экспериментальной установки радиационно-конвективно-микроволнового нагрева: 1 – штатив; 2 – древесная частица; 3 – источник микроволнового излучения; 4 – прозрачный цилиндр; 5 – отверстие на задней стенке корпуса камеры микроволновой печи для видеосъемки; 6 – отверстие для ввода частицы древесины; 7 – высокоскоростная видеокамера; 8 – персональный компьютер; 9 – проточный нагреватель; 10 – нагнетатель

**Fig. 2.** Scheme of the experimental setup for convective microwave heating: 1 – tripod; 2 – wood particle; 3 – source of microwave radiation; 4 – transparent cylinder; 5 – hole on the rear wall of the microwave oven chamber for video recording; 6 – hole for introducing wood particles; 7 – high-speed video camera; 8 – personal computer; 9 – flow heater; 10 – supercharger

Экспериментальная установка представляла собой проточную реакционную камеру цилиндрической формы (рис. 2), расположенную в теплоизолированном кожухе. Через эту камеру продувался высокотемпературный окислитель (воздух). Температура последнего варьировалась в диапазоне от 713 до 783 К. В верхней полусфере камеры монтировались четыре магнетрона так, чтобы топливная частица попадала в фокус излучения магнетронов. Отвод теплоты от магнетронов осуществлялся через радиатор воздушного охлаждения. Топливная частица при помощи дистанционно-управляемого координатного устройства помещалась в камеру сгорания. Все процессы термической подготовки, зажигания и горения регистрировались высокоскоростной видеокамерой.

#### Результаты экспериментальных исследований

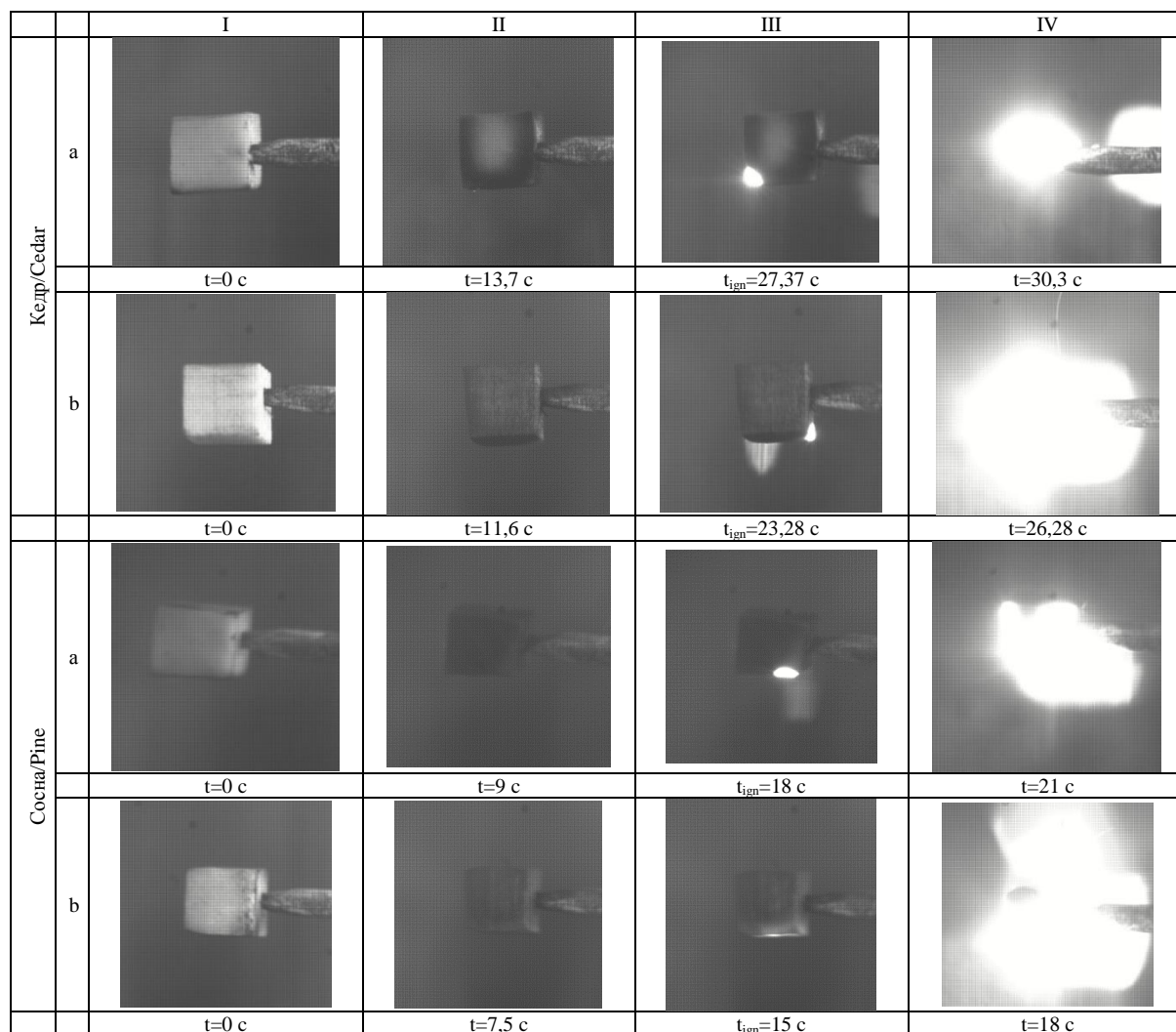
На рис. 3, 4 приведены кадры типичной видеосъемки, демонстрирующие процесс воспламенения

частицы древесины (не насыщенной влагой – рис. 3; с влажностью 47 % – рис. 4) в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве. Анализ кадров показывает, что процесс термической подготовки можно условно разделить на ряд последовательных взаимосвязанных стадий. При попадании в высокотемпературную среду и СВЧ-поле (стоячая волна) топливная частица нагревается за счет конвекции и излучения, а также вследствие поглощения СВЧ-излучения. Такое сложное тепловое воздействие инициирует интенсивное испарение внутрисферической и адсорбционно-связанной влаги. Дальнейший нагрев приводит к термическому разложению основных компонентов биомассы. Последнее характеризуется обугливанием поверхности частицы (рис. 3, 4 столбец II, характерное потемнение поверхности биомассы).

При этом можно отметить, что размер частиц несколько уменьшается (рис. 5). Детальный (при боль-

шом увеличении) анализ кадров показал, что размеры частицы в среднем уменьшаются на 13 %. Скорее всего, это связано с термической деструкцией основного слоя топлива, приводящей к формированию высокопористого угольного каркаса с низким коэффициентом ударной вязкости. Как показано в [28], пары воды и газообразные продукты термодеструкции основных компонентов биомассы фильтруются сквозь пористый угольный каркас и вступают в хи-

мическую реакцию с углеродом. В результате внутри частицы формируется газообразные продукты реагирования. Образующаяся во внутрипоровой структуре парогазовая смесь приводит к росту внутреннего давления в частице (как показано по результатам математического моделирования [28]) и, соответственно, к диспергированию приповерхностного слоя топлива, и уносу его части вследствие аэродинамического воздействия внешним потоком.



**Рис. 3.** Типичные кадры процесса воспламенения сухих частиц древесной биомассы при температуре внешней среды  $T_g=753\text{ K}$  (a) в условиях радиационно-конвективного нагрева; б) в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве)

**Fig. 3.** Typical shots of ignition of dry particles of woody biomass at ambient temperature  $T_g=753\text{ K}$  (a) under conditions of radiative-convective heating; б) under conditions of microwave exposure at high-temperature radiation-convective heating)

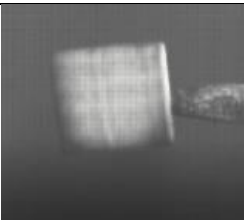
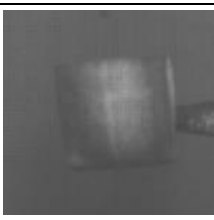


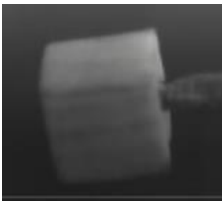
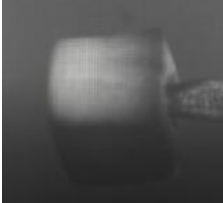


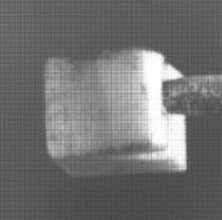
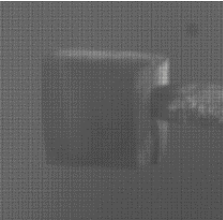
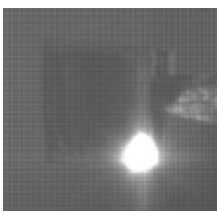
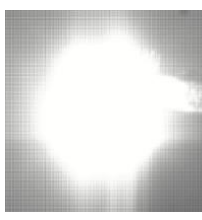
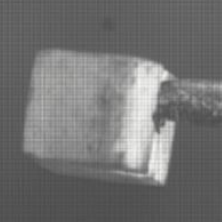
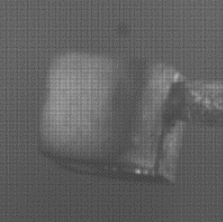
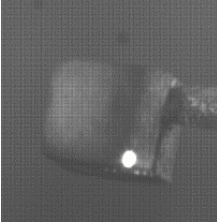
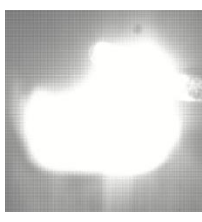
Летучие продукты пиролиза совместно с водяными парами вдуваются во внешнюю среду, где перемешиваются с окислителем и вступают в термохимическое взаимодействие с кислородом воздуха. В результате происходит воспламенение частицы топлива (рис. 3, 4, III). Формируется сфера пламени, которая по своим размерам, как правило, превышает размер частицы (рис. 3, 4, IV).

На рис. 6 приведены зависимости времен задержки зажигания сухих частиц древесной биомассы (сосны и кедра) в условиях относительно низких темпера-

тур внешней среды при радиационно-конвективном и радиационно-конвективно-микроволновом нагревах.

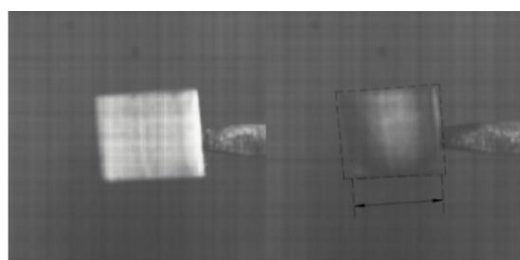
На основании анализа рис. 6 можно сделать вывод, что микроволновое воздействие приводит к достаточно заметному ускорению процесса воспламенения частиц древесной биомассы в диапазоне температур среды от 713 до 783 K. В области относительно низких температур (от 713 до 753 K) воздействие СВЧ-излучения приводит к росту скорости зажигания в среднем на 12 %.



		I	II	III	IV
Кедр/Cedar	a				
		t=0 с	t=11,4 с	t <sub>ign</sub> =22,8 с	t=27,8 с
	b				
		t=0 с	t=10,2 с	t <sub>ign</sub> =20,37 с	t=25,37 с
Сосна/Pine	a				
		t=0 с	t=14,8 с	t <sub>ign</sub> =29,6 с	t=34,6 с
	b				
		t=0 с	t=13,85 с	t <sub>ign</sub> =27,7 с	t=32,7 с

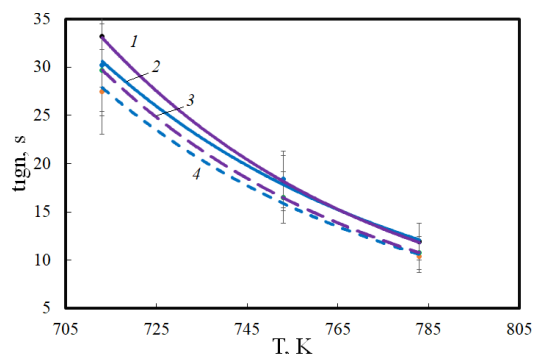
**Рис. 4.** Типичные кадры процесса воспламенения влагонасыщенных частиц древесной биомассы при температуре внешней среды  $T_g=753$  K (a) в условиях радиационно-конвективного нагрева; б) в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве)

**Fig. 4.** Typical frames of ignition of moisture-saturated particles of woody biomass at an ambient temperature  $T_g=753$  K (a) under conditions of radiative-convective heating; б) under conditions of microwave exposure at high-temperature radiation-convective heating)



**Рис. 5.** Изменение размера топлива в процессе пиролиза древесной частицы

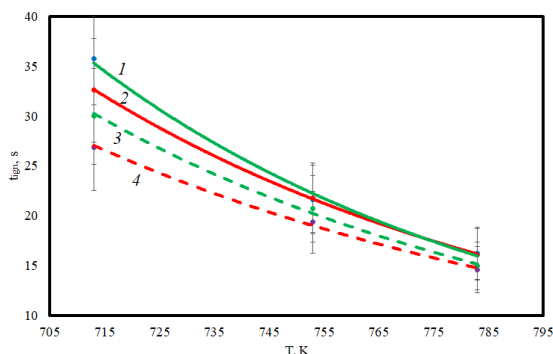
**Fig. 5.** Changing the size of the fuel during the pyrolysis of a wood particle



**Рис. 6.** Зависимости времен задержки зажигания сухих древесных частиц от температуры внешней среды: 1, 3 – частицы кедр; 2, 4 – частицы сосны; 1, 2 – радиационно-конвективный нагрев; 3, 4 – радиационно-конвективно-микроволновой нагрев

**Fig. 6.** Dependences of ignition delay times of dry wood particles on ambient temperature: 1, 3 – cedar particles; 2, 4 – pine particles; 1, 2 – radiative-convective heating; 3, 4 – radiation-convective-microwave heating

На рис. 7 приведены зависимости времен задержки зажигания влагонасыщенных частиц древесины в условиях радиационно-конвективного и радиационно-конвективно-микроволнового нагревов. Анализ результатов, приведенных на рис. 6, 7, показал, что температуры окислительной среды оказывает меньшее влияние на времена задержки зажигания влагонасыщенной древесины по сравнению с сухой. Так, для сухих частиц древесины при увеличении  $T_g$  с 713 до 785 К времена задержки зажигания уменьшались практически в 3 раза. Для влажных частиц в том же температурном диапазоне снижение происходило лишь в 1,8 раз. Но при этом влажные древесные частицы под воздействием СВЧ-излучения закипаются в среднем на 18 % быстрее по сравнению с условиями воздействия радиационно-конвективного нагрева. Сравнительный анализ рис. 6, 7 показывает, что наибольший эффект от микроволнового воздействия достигается при зажигании влагонасыщенных частиц древесной биомассы.



**Рис. 7.** Зависимости времен задержки зажигания влажных древесных частиц от температуры внешней среды: 1, 3 – частицы кедр; 2, 4 – частицы сосны; 1, 2 – радиационно-конвективный нагрев; 3, 4 – радиационно-конвективно-микроволновой нагрев;

**Fig. 7.** Dependences of ignition delay times of wet wood particles on ambient temperature: 1, 3 – cedar particles; 2, 4 – pine particles; 1, 2 – radiative-convective heating; 3, 4 – radiation-convective-microwave heating;

#### Обоснование применения СВЧ-нагрева в технологии топливосжигания

Одним из основных преимуществ использования СВЧ-энергии для предварительной термической подготовки топлива являются также низкие затраты энергии. Это, бесспорно, делает технологию СВЧ-сушки востребованной для использования на тепловых электрических станциях. Микроволновая установка, имеющая небольшие размеры, является удобной для использования ее на районных или местных котельных [29]. Важнейшим преимуществом микроволнового воздействия является способность электромагнитного поля проникать в материал на значительную глубину, создавая объемное распределение источников тепла, без необходимости присутствия внешнего нагрева. СВЧ воздействие является свободно контролируемым и практически безинерционным процессом, что дает возможность мгновенно опти-

мально контролировать и управлять процессом термической подготовки. Также одним из важнейших преимуществ СВЧ-излучения является его избирательный характер, поэтому отдельные компоненты многокомпонентного материала нагреваются по-разному, в зависимости от их коэффициента поглощения. Это свойство широко используется при сушке материалов [30]. В пористых материалах в процессе микроволновой сушки влага непрерывно движется от внутренних слоев к поверхности материала и испаряется с поверхности, а образующийся пар диффундирует в окружающую среду. Применение СВЧ-излучения во многих случаях повышает экономичность процесса влагоудаления. СВЧ-установки с общим КПД использования электроэнергии, достигающим 85 % за счет отсутствия промежуточных носителей тепла, значительно улучшают процессы зажигания и горения частиц твердых топлив [31]. В [32] приведены экономические показатели замены технологии конвективной сушки бурого угля на технологию влагоудаления по средствам микроволнового нагрева.

**Таблица.** Показатели экономической эффективности сушки бурого угля на микроволновой установке [32]

**Table.** Indicators of economic efficiency of drying brown coal at the microwave unit [32]

Показатель Index	Единица измерения Unit	Величина Value
Расход топлива Fuel consumption	кг/с/kg/s	0,27
Капитальные затраты Capital expenditures	р./rub.	180508
Выгода/Profit		862,7
Период окупаемости Payback	месяц/month	≥12

#### Заключение

Результаты экспериментов показали, что дополнительное СВЧ воздействие приводит к ускорению и стабилизации всего комплекса процессов воспламенения и горения частиц древесного биотоплива. При этом показано, что наибольший синергетический эффект от использования СВЧ-подсветки топлива в процессе горения достигается в условиях низкотемпературного нагрева. Соответственно, можно сказать, что использование микроволновой энергии в технологиях топливосжигания позволяет разработать топочные устройства сжигающих топлива при температурах внешней среды, значение которых ниже уровня образования оксидов серы и азота.

По результатам проведенных экспериментов также установлено, что микроволновое воздействие наиболее эффективно при сжигании влагонасыщенных топлив. Последнее обусловлено тем, что внутрипорная вода наиболее интенсивно поглощает микроволновое излучение. В результате можно сказать, что технология микроволновой подсветки топливного факела позволяет обеспечить стабильное эколого- и энергоэффективное сжигание древесины.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10015-П) <https://rscf.ru/project/21-79-03032/>



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fouquet R., Hippe R. Twin transitions of decarbonisation and digitalisation: A historical perspective on energy and information in European economies // *Energy Research & Social Science*. – 2022. – V. 91. – 102736.
2. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration / A. Alem Kebede, Th. Kalogiannis, J. van Mierlo, M. Berecibar // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – V. 159. – 112213.
3. A review on energy storage devices based on rylene imide dyes: Synthesis, applications and challenges / M.R. Biradar, S.V. Bhosale, P.P. Morajakar, Sh.V. Bhosale // *Fuel*. – 2022. – V. 310. – 122487.
4. Груздев А.И. Состояние, проблемы и направления развития современных накопителей электрической энергии // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. – 2008. – № 7. – С. 116–124.
5. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems / Liangzhong Yao, Bo Yang, Hongfen Cui, Jun Zhuang, Jilei Ye, Jinhua Xue // *J. Mod. Power Syst / Clean Energy*. – 2016. – V. 4 (4). – P. 519–528.
6. Perdana S., Vielle M., Schenckery M. European Economic impacts of cutting energy imports from Russia: A computable general equilibrium analysis // *Energy Strategy Reviews*. – 2022. – V. 44. – 101006.
7. Wood burning: a major source of volatile organic compounds during winter time in the Paris region / B. Languille, V. Gros, J.-E. Petit, C. Honoré, A. Baudic, O. Perrussel, G. Foret, V. Michoud, F. Truong, N. Bonnaire, R. Sarda-Estève, M. Delmotte, A. Feron, F. Maisonneuve, C. Gaimoz, P. Formenti, S. Kotthaus, M. Haefelin, O. Favez // *Science of the Total Environment*. – 2020. – V. 711. – 135055.
8. Biomass transport for energy: cost, energy and CO2 performance of forest wood and manure transport chains in Switzerland / V. Schnorf, E. Trutnevte, G. Bowman, V. Burg // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – V. 293. – 125971.
9. Simonsen M., Kjønaas O.J., Aal C. Substitution of fossil-energy intensive building materials by wood products – does it matter? A case study from Western Norway // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – V. 383. – 134941.
10. Increasing extracellular cellulase activity of the recombinant *Saccharomyces cerevisiae* by engineering cell wall-related proteins for improved consolidated processing of carbon neutral lignocellulosic biomass / Jie Li, Yu Zeng, Wei-Bin Wang, Qing-Qing Wan, Chen-Guang Liu, Riaan den Haan, Willem H van Zyl, Xin-Qing Zhao // *Bioresource Technology*. – 2022. – V. 365. – 128132.
11. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment / D.K. Shen, S. Gu, K.H. Luo, A.V. Bridgwater, M.X. Fang // *Fuel*. – 2009. – V. 88. – 1024.
12. Emissions of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels / E. Rokni, X. Ren, A. Panahi, Y.A. Levendis // *Fuel*. – 2018. – V. 211. – P. 363–374.
13. Yilgin M., Pehlivan D.D. Volatiles and char combustion rates of demineralized lignite and wood blends // *Applied Energy*. – 2009. – V. 86. – P. 1179.
14. Influence of phosphorus based additives on nitrogen and sulfur pollutants emissions during densified biochar combustion / Qian Wang, Qiankun Cao, Rui Wang, Peifu Wang, Yanhua Zhao, Shijie Li, Feifei Han // *Energy*. – 2023. – V. 275. – 127442.
15. Haykiri-Acma H., Yaman S. Combinations of synergistic interactions and additive behavior during the co-oxidation of chars from lignite and biomass // *Fuel Processing Technology*. – 2008. – V. 89. – P. 176–182.
16. Haykiri-Acma H., Yaman S. Effect of co-combustion on the burn out of lignite/ biomass blends: a Turkish case study // *Waste Manag.* – 2008. – V. 28. – P. 2077–2084.
17. Левин Э.Д., Репях С.М. Переработка древесной зелени. – М.: Изд-во «Наука», 1984. – 120 с.
18. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1990. – 336 с.
19. Косторева Ж.А., Малышев Д.Ю., Сыродой С.В. Определение условий и характеристик зажигания частиц влажной древесины для повышения ресурсоэффективности теплоэнергетики // *Известия Томского политехнического университета Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 97–105.
20. Финкер Ф.З., Капица Д.В., Кубышкин И.Б. От вихревой топки до ВИР-сжигания // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. – 2011. – № 1. – С. 309–317.
21. Математическое моделирование распространения электромагнитного импульса в твердотопливной энергетической установке / А.С. Воронцов, М.Б. Марков, Ю.М. Милехин, Д.Н. Садовничий. – М.: Федеральный центр двойных технологий «Союз», Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2010. – С. 1–17.
22. Лебедев П.Д. Сушка инфракрасными лучами. – М.: Изд-во «Наука», 1953. – 232 с.
23. Милехин Ю.М., Садовничий Д.Н., Гусев С.А. Электризация твердотопливных энергетических установок при воздействии ионизирующего излучения // *Сб. трудов «Физика экстремальных состояний вещества-2006»* / под ред. акад. В.Е. Фортова. – Черноголовка: Институт проблем химической физики РАН, 2006. – С. 163–164.
24. Гареев Ф.Х. Проблемы и перспективы СВЧ-сушки древесины // *Лесная промышленность*. – 2004. – Т. 14. – № 1. – С. 50–53.
25. Шубин Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1973. – 248 с.
26. Галкин В.П. Древесиноведческие аспекты инновационной технологии сушки древесины: монография. – М.: Изд-во ГОУ ВПО «МГУЛ», 2010. – 238 с.
27. Ignition and combustion characteristics of coal - water fuels based on coal & semi-coke / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, V.V. Salomatov, D.Y. Malyshev, Z.A. Kostoreva, M.V. Purin, S.A. Yankovsky // *Combustion and Flame*. – 2022. – V. 246. – 112430.
28. A comparative analysis of the characteristics of the water removal processes in preparation for incineration of typical wood waste and forest combustible materials / G.V. Kuznetsov, N.A. Nigay, S.V. Syrodoy, N.Yu. Gutareva, D.Yu. Malyshev // *Energy*. – 2022. – V. 239. – 122362.
29. Саломатов В.В., Сладков С.О., Пашенко С.Э. СВЧ-технологии в угольной энергетике // *Инженерно-физический журнал*. – 2012. – Т. 85. – № 3. – С. 535–549.
30. Брандт Л.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Физматгиз, 1963. – 404 с.
31. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. – М.: Изд-во ИЛ, 1960. – 438 с.
32. Хайдурова А.А. Улучшение качественных характеристик твердого топлива воздействием микроволновой энергии при его подготовке к сжиганию: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Улан-Удэ, 2010. – 17 с.

Поступила: 06.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 18.04.2023 г.

## Информация об авторах

**Сыродой С.В.**, доктор технических наук, доцент Инженерной школы энергетике НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Малышев Д.Ю.**, кандидат технических наук, ассистент Инженерной школы энергетике НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Косторева Ж.А.**, кандидат технических наук, ассистент Инженерной школы энергетике НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Косторева А.А.**, инженер, ОА ТомскРТС.

**Омаров А.А.**, магистрант, Инженерной школы энергетике НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

УДК 662.71

## IGNITION OF WOODEN BIOMASS PARTICLES UNDER MICROWAVE EXPOSURE AT HIGH-TEMPERATURE RADIATION-CONVECTIVE HEATING

**Semen V. Syrodoyn**<sup>1</sup>,  
ssyrodoyn@yandex.ru

**Dmitry Yu. Malyshev**<sup>1</sup>,  
dmitry.mlv@gmail.com

**Zhanna A. Kostoreva**<sup>1</sup>,  
zhanna.kostoreva@yandex.ru

**Anastasia A. Kostoreva**<sup>2</sup>,  
nastia.kostoreva@yandex.ru

**Azimkhan A. Omarov**<sup>1</sup>,  
aao35@tpu.ru

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

<sup>2</sup> TomskRTS,  
4a, Nakhonovich lane, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance.** Despite the active development of technologies for the production of electrical energy by means of wind power generators and solar batteries, by 2100, most of the energy will still be generated at thermal power plants that burn fossil fuels. As a rule, thermal power plants use coal as fuel (about 40 %). However, it should be noted that during the combustion of coal in the furnaces of steam and hot water boilers, toxic oxides of sulfur and nitrogen are intensively formed. In this regard, many scientists of the world working in the field of energy are working to create new innovative technologies for the eco- and energy-efficient production of heat and electricity. The latter include technologies for burning woody biomass in the furnaces of steam and hot water boilers of thermal power plants. The use of woody biomass can significantly reduce the environmental impact of thermal power plants on the atmosphere. However, no technology has yet been developed to burn wood with high energy efficiency. The latter is due to the high moisture saturation of woody biomass in its initial state.

**The main aim:** experimental determination of the main stages and identification of a complex of physicochemical processes occurring together during the ignition of woody biomass particles under microwave exposure under high-temperature radiation-convective heating.

**Object:** dry and moisture-saturated wood of two types (pine and cedar). The relative humidity of the wood from which the particles were made (with a characteristic size of 4 mm) varied from 6 % (relatively dry biomass) to 42 % (moisture-saturated wood).

**Method.** To establish the main characteristics of wood particle ignition under microwave exposure under high-temperature radiation-convective heating, a special experimental stand was developed, representing a reaction tube with heat-insulated radio-transparent walls through which a high-temperature oxidizer (air oxygen) was blown. The wood particle was mounted on the axis of the pipe so as to fall into the focus of the emitter. All processes were recorded by a high-speed video camera.

**Results.** The paper introduces the results of experimental studies of ignition of dry and wet particles of woody biomass in the environment of air heated to high temperatures under conditions of radiation-convective and radiation-convective microwave heating. A significant influence of the type of wood on the ignition delay times ( $t_{ign}$ ) was established. Rather significant effect of heating conditions on ignition is also shown, since microwave exposure leads to an acceleration of ignition of woody biomass particles. It was shown that during the ignition of wet wood particles, the effect of exposure to microwave radiation (acceleration of ignition) is more significant compared to ignition of dry wood particles. It was also found that the moisture content ( $\phi$ ) of woody biomass significantly affects the ignition delay times (increase in  $\phi$  leads to growth in the  $t_{ign}$  value). The regularities established in the conducted experiments illustrate the prospects of using woody biomass (including moisture-saturated) in thermal power engineering as the main fuel.

### Key words:

Woody biomass, combustion initiation, thermal preparation time, induction, microwave heating.

*The research was carried out due to the grant of the Russian Science foundation (project no. 18-79-10015-P).*

### REFERENCES

1. Fouquet R., Hippe R. Twin transitions of decarbonisation and digitalisation: A historical perspective on energy and information in European economies. *Energy Research & Social Science*, 2022, vol. 91, 102736 p.
2. Alem Kebede A., Kalogiannis Th., Van Mierlo J., Bercibar M. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 159, 112213 p.
3. Biradar M.R., Bhosale S.V., Morajakar P.P., Bhosale Sh.V. A review on energy storage devices based on rylene imide dyes: Synthesis, applications and challenges. *Fuel*, 2022, vol. 310, 122487 p.
4. Gruzdev A.I. Status, problems and directions of development of modern electric energy storage devices. *International Scientific Journal «Alternative Energy and Ecology»*, 2008, vol. 7 (63), pp. 116–124. In Rus.
5. Liangzhong Yao, Bo Yang, Hongfen Cui, Jun Zhuang, Jilei Ye, Jinhua Xue. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, 2016, vol. 4 (4), pp. 519–528.

6. Perdana S., Vielle M., Schenckery M. European economic impacts of cutting energy imports from Russia: A computable general equilibrium analysis. *Energy Strategy Reviews*, 2022, vol. 44, 101006.
7. Languille B., Gros V., Petit J.-E., Honoré C., Baudic A., Perrussel O., Foret G., Michoud V., Truong F., Bonnaire N., Sarda-Estève R., Delmotte M., Feron A., Maisonneuve F., Gaimoz C., Formenti P., Kotthaus S., Haeffelin M., Favez O. Wood burning: a major source of volatile organic compounds during wintertime in the Paris region. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 711, 135055.
8. Schnorf V., Trutnevte E., Bowman G., Burg V. Biomass transport for energy: cost, energy and CO<sub>2</sub> performance of forest wood and manure transport chains in Switzerland. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 293, 125971.
9. Simonsen M., Kjønaas O.J., Aal C. Substitution of fossil-energy intensive building materials by wood products – does it matter? A case study from Western Norway. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 383, 134941.
10. Jie Li, Yu Zeng, Wei-Bin Wang, Qing-Qing Wan, Chen-Guang Liu, Riaan den Haan, Willem H van Zyl, Xin-Qing Zhao. Increasing extracellular cellulase activity of the recombinant *Saccharomyces cerevisiae* by engineering cell wall-related proteins for improved consolidated processing of carbon neutral lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol*, 2022, vol. 365, 128132.
11. Shen D.K., Gu S., Luo K.H., Bridgwater A.V., Fang M.X. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. *Fuel*, 2009, vol. 88, 1024 p.
12. Rokni E., Ren X., Panahi A., Levendis Y.A. Emissions of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels. *Fuel*, 2018, vol. 211, pp. 363–374.
13. Yilgin M., Pehlivan D.D. Volatiles and char combustion rates of demineralized lignite and wood blends. *Applied Energy*, 2009, vol. 86, 1179 p.
14. Qian Wang, Qiankun Cao, Rui Wang, Peifu Wang, Yanhua Zhao, Shijie Li, Feifei Han. Influence of phosphorus based additives on nitrogen and sulfur pollutants emissions during densified biochar combustion. *Energy*, 2023, vol. 275, 127442.
15. Haykiri-Acma H., Yaman S. Combinations of synergistic interactions and additive behavior during the co-oxidation of chars from lignite and biomass. *Fuel Processing Technology*, 2008, vol. 89, pp. 176–182.
16. Haykiri-Acma H., Yaman S. Effect of co-combustion on the burn out of lignite/biomass blends: a Turkish case study. *Waste Manag*, 2008, vol. 28, pp. 2077–2084.
17. Levin E.D., Repyakh S.M. *Pererabotka drevesnoy zeleni* [Processing of tree greens]. Moscow, nauka Publ., 1984. 120 p.
18. Shubin G.S. *Sushka i teplovaya obrabotka drevesiny* [Drying and heat treatment of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1990. 336 p.
19. Kostoreva Z.A., Malyshev D.Yu., Syrodo S.V. Definition of wet wood particles ignition conditions and characteristics to increase the resource efficiency of heat power engineering. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 97–105. In Rus.
20. Finker F.Z., Kapitsa D.V., Kubyshev I.B. From a firebox to VIR-burning. Scientific and technical statements of SPbSPU. *Science and education*, 2011, vol. 1, pp. 309–317. In Rus.
21. Vorontsov A.S., Markov M.B., Milekhin Yu.M., Sadovnichy D.N. *Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya elektromagnitnogo impulsa v tverdotoplivnoy ustanovke* [Mathematical modeling of the propagation of an electromagnetic pulse in a solid fuel power plant]. Moscow, M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS Publ., 2010. pp. 1–17.
22. Lebedev P.D. *Sushka infrakrasnymi luchami* [Drying with infrared rays]. Moscow, Nauka Publ., 1953. 232 p.
23. Milekhin Yu.M., Sadovnichy D.N., Gusev S.A. Elektrizatsiya tverdotoplivnykh energeticheskikh ustanovok pri vozdeystvii ioniziruyushchego izlucheniya [Electrization of solid fuel power plants under the influence of ionizing radiation]. *Sbornik trudov. Fizika ekstremalnykh sostoyaniy veshchestva-2006* [Proceedings. Physics of extreme states of matter-2006]. Ed. by V.E. Fortov. Chernogolovka, Institute of Problems of Chemical Physics RAS Publ., 2006. pp. 163–164.
24. Gareev F.Kh. Problems and prospects of microwave drying of wood. *Forest industry*, 2004, vol. 14, no. 1, pp. 50–53. In Rus.
25. Shubin G.S. *Fizicheskie osnovy i raschety protsessov sushki drevesiny* [Physical foundations and calculation of wood drying processes]. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1973. 248 p.
26. Galkin V.P. *Drevesinovedcheskie aspekty innovatsionnykh tekhnologii sushki drevesiny: monografiya* [Wood science aspects of innovative wood drying technology: monograph]. Moscow, GOU VPO «MGUL» Publ., 2010. 238 p.
27. Kuznetsov G.V., Syrodo S.V., Salomatov V.V., Malyshev D.Y., Kostoreva Z.A., Purin M.V., Yankovsky S.A. Ignition and combustion characteristics of coal-water fuels based on coal & semi-coke. *Combustion and Flame*, 2022, vol. 246, 112430.
28. Kuznetsov G.V., Nigay N.A., Syrodo S.V., Gutareva N.Yu., Malyshev D.Yu. A comparative analysis of the characteristics of the water removal processes in preparation for incineration of typical wood waste and forest combustible materials. *Energy*, 2022, vol. 239, 122362.
29. Salomatov V.V., Sladkov S.O., Pashchenko S.E. Microwave technologies in coal energy. *Engineering and Physical Journal*, 2012, vol. 85, no. 3, pp. 535–549. In Rus.
30. Brandt L.A. *Issledovanie dielektrikov na sverkhvysokikh chastotakh* [Investigation of dielectrics at ultrahigh frequencies]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 404 p.
31. Hippel A.R. *Dielektriki i volny* [Dielectrics and waves]. Moscow, IL Publ., 1960. 438 p.
32. Khaidurova A.A. *Uluchshenie kachestvennykh kharakteristik tverdogo topliva vozdeystviem mikrovolnovoy energii pri ego podgotovke k szhiganiyu*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Improving the qualitative characteristics of solid fuel by exposure to microwave energy during its preparation for combustion. Cand. Diss. Abstract]. Ulan-Ude, 2010. 17 p.

Received: 6 April 2023.  
Reviewed: 18 April 2023.

#### Information about the authors

**Semen V. Syrodo**, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Dmitry Yu. Malyshev**, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Zhanna A. Kostoreva**, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Anastasia A. Kostoreva**, engineer, TomskRTS.

**Azimkhan A. Omarov**, master student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.3

## ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ ДОБЫВАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ С ВНУТРИСКВАЖИННЫМ КОМПЕНСАТОРОМ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Глазырин Александр Савельевич<sup>1,2</sup>,  
asglazyrin@tpu.ru

Исаев Юсуп Ниязбекович<sup>1</sup>,  
isaev@tpu.ru

Копырин Владимир Анатольевич<sup>3</sup>,  
kopyrinva@gmail.com

Тимошкин Вадим Владимирович<sup>1</sup>,  
timoshkinvv@tpu.ru

Кладиев Сергей Николаевич<sup>1</sup>,  
kladiev@tpu.ru

Хамитов Рустам Нуриманович<sup>3,4</sup>,  
apple\_27@mail.ru

Ковалев Владимир Захарович<sup>2,1</sup>,  
vz\_kovalev@mail.ru

Лосев Федор Алексеевич<sup>3</sup>,  
losevfa@tyuiu.ru

Леонов Андрей Петрович<sup>1</sup>,  
leonov\_ap@tpu.ru

Попов Евгений Игоревич<sup>3</sup>,  
popovai@tyuiu.ru

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

<sup>2</sup> Югорский государственный университет, Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

<sup>3</sup> Тюменский индустриальный университет, Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

<sup>4</sup> Омский государственный технический университет, Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

**Актуальность.** В настоящее время при повсеместном усложнении технологических процессов для повышения эффективности производственных процессов за счет внедрения нового оборудования происходят конфликты между функциональными возможностями различных технических средств и их способностью функционировать с заданным качеством, в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам. В состав электротехнического комплекса для добычи нефти, под которым понимается совокупность наземного и погружного электрооборудования, скомпонованного для приема, трансформации, управления, преобразования электрической энергии в механическую и передачи её погружному насосу, входят различные электротехнические и электронные устройства: станция управления с преобразователем частоты, повышающий трансформатор, кабельная линия, погружной электродвигатель, внутрискважинный компенсатор реактивной мощности и другие устройства. Любое изменение компоновки электротехнических комплексов для добычи нефти или технических характеристик используемого оборудования требует тщательного исследования переходных процессов между режимами работы электрооборудования для предотвращения рисков ложного срабатывания устройств защиты электротехнического оборудования.

**Цель:** анализ переходных процессов в электротехническом комплексе добывающей скважины с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности при отключении источника питания с целью предупреждения рисков ложного срабатывания устройств защиты компенсатора.

**Объект:** участок системы электроснабжения куста нефтедобывающих скважин, оснащенных установками электроцентробежных насосов с внутрискважинными компенсаторами реактивной мощности.

**Методы:** использованы положения теоретических основ электротехники, теории электропривода, теория дифференциальных уравнений, численные методы.

**Результаты.** Разработана математическая модель электротехнического комплекса установки электроприводного центробежного насоса с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности, позволяющая исследовать переходные процессы в режиме пуска и остановки погружного асинхронного электродвигателя. Получены характеристики переходных процессов в элементах электротехнического комплекса установки электроприводного центробежного насоса при включении и отключении источника питания. Установлено, что максимальный бросок тока во внутрискважинном компенсаторе реактивной мощности составляет 2,56 раза при принятых в исследовании параметрах электротехнического комплекса добывающей скважины. Предложены мероприятия по снижению количества ложных срабатываний устройств защиты.

### Ключевые слова:

внутрискважинный компенсатор, переходные процессы, погружной электроцентробежный насос, погружной электродвигатель, математическая модель.

### Введение

В настоящее время снижение финансовых затрат на добычу нефти и увеличение конкурентоспособности нефтедобывающей промышленности являются

важными задачами, решение которых достигается путем повышения энергоэффективности процесса добычи. Суммарное потребление электроэнергии российскими предприятиями нефтегазовой отрасли в

2021 г. оценивается порядка 89,5 млрд кВт·ч, что составляет 8 % от общей выработки электрической энергии в нашей стране [1].

Основная доля потребления электроэнергии в процессе добычи нефти связана с подъемом пластовой жидкости, которая составляет от 55 до 62 % от общего потребления электроэнергии [2].

Основным потребителем электроэнергии в электротехническом комплексе (ЭТК) погружной установки добычи нефти является электродвигатель, который, в свою очередь, приводит во вращение вал электроприводного центробежного насоса. На сегодняшний день в составе ЭТК установки центробежного электронасоса (УЭЦН) применяются асинхронные или вентильные электродвигатели [3–5]. Широкое распространение получили асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором, поскольку при одинаковых мощностных характеристиках имеют меньшую стоимость по сравнению с вентильными электродвигателями и высокую наработку на отказ порядка 790 суток. Тем не менее погружные асинхронные электродвигатели обладают существенным недостатком, а именно, низким коэффициентом мощности, который в номинальном режиме эксплуатации варьируется от 0,8 до 0,84. Низкий коэффициент мощности приводит к дополнительным потерям мощности в токопроводящих элементах ЭТК УЭЦН, достигающим до 40 % от суммарной потребляемой мощности. Далее в статье в качестве погружного электромеханического преобразователя энергии принята асинхронная электрическая машина с короткозамкнутым ротором.

С целью повышения коэффициента мощности и снижения потерь в ЭТК УЭЦН в 2018 г. на заводе ООО «Алмаз-нефтесервис» в г. Радужном при научно-техническом сопровождении авторов статьи и ООО «Научно-производственная компания «Техойл»» изготовлен опытный образец внутрискважинного компенсатора реактивной мощности (ВКРМ) (рис. 1). Изготовленный образец мощностью 53,5 кВАр предназначен для работы в составе погружной установки для добычи нефти, оснащенной двухсекционным погружным электродвигателем марки ЭД-125-117-М5В5 мощностью 125 кВт. В ходе стендовых испытаний опытного образца зафиксировано снижение тока погружного электродвигателя на 16 % – с 51 до 42,8 А. По результатам положительных стендовых испытаний принято решение о проведении опытно-промышленных испытаний.

На сегодняшний день изготовлено шесть опытных образцов ВКРМ мощностью 50, 53,5 и 80 кВАр. По результатам проведения стендовых испытаний зафиксировано снижение тока погружных асинхронных электродвигателей на 20 % и повышение коэффициента мощности с 0,8 до 0,95, согласно программе испытаний. В ходе мониторинга энергопотребления на испытываемых нефтедобывающих скважинах зафиксировано снижение тока УЭЦН от 14,5 до 20 % [6]. С целью снижения рисков преждевременной остановки УЭЦН при неисправности внутрискважинного компенсатора и высокой стоимости спускоподъемных

операций, проводимых в ходе ремонтно-восстановительных работ, последние три опытных образца оснащены устройствами защиты с функцией автоматического отключения.



Рис. 1. Опытный образец внутрискважинного компенсатора реактивной мощности

Fig. 1. Prototype of downhole reactive power compensator (DRPC)

Функция автоматического отключения ВКРМ реализована на базе электромеханического реле, которое позволяет отключить компенсатор при преждевременном выходе из строя конденсаторов, вследствие короткого замыкания или пробоя диэлектрика.

В ходе опытно-промышленных испытаний погружной установки с ВКРМ выявлено, что при отключении станции управления в некоторых случаях происходит ложное срабатывание электромеханического реле внутрискважинного компенсатора, вызванное токами разряда конденсаторов, которые превышают ток отстройки реле. Ток разряда определяется моментом отключения станции управления и амплитудой тока до коммутации. Ввиду конструктивных особенностей скважинного оборудования работа электромеханического реле реализована только на отключение и возможность его повторного включения отсутствует. Дальнейшее включение предполагает проведение спускоподъемных операций, что экономически нецелесообразно. В связи с этим исследование и разработка мероприятий, направленных на снижение случаев ложного срабатывания устройств защиты ВКРМ, являются актуальными.

#### Объект и методы исследования

Исследуемый участок электротехнического комплекса УЭЦН включает: источник питания (ИП), повышающий (питающий) трансформатор (Т), кабельную линию (КЛ), погружной асинхронный электродвигатель (ПЭД) [7] и внутрискважинный компенсатор реактивной мощности (рис. 2).

В структуре ЭТК УЭЦН внутрискважинный компенсатор реактивной мощности является достаточно емким накопителем энергии. В момент, когда происходит отключение станции управления, сопротивление отключаемого участка цепи ЭТК УЭЦН опреде-

ляется сопротивлениями погружного электродвигателя, повышающего трансформатора, кабельной линии и внутрискважинного компенсатора. Характеристики

напряжения и тока переходного процесса в элементах комплекса определяются начальными условиями и параметрами элементов ЭТК УЭЦН.

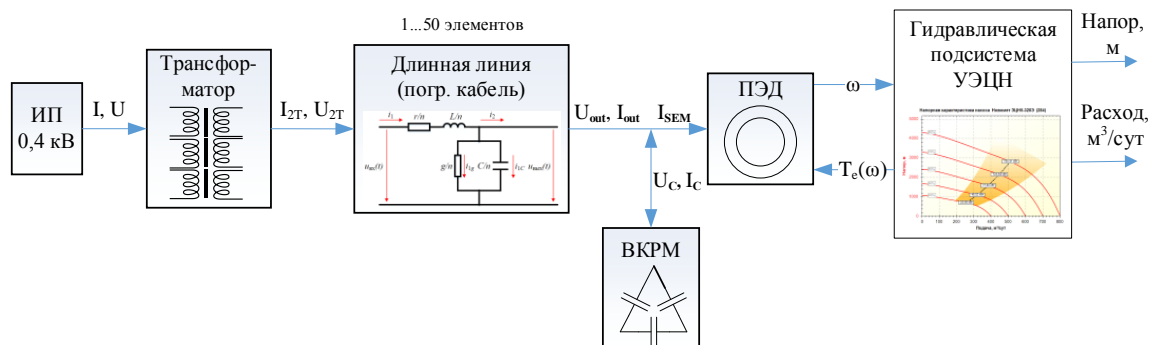


Рис. 2. Структурная схема исследуемого электротехнического комплекса УЭЦН

Fig. 2. Single-line diagram of the investigated electrical complex

При моделировании были приняты следующие допущения и упрощения [8–11]:

1. Параметры элементов ЭТК УЭЦН линейны, т. е. отсутствуют явления гистерезиса и насыщения.
2. Электрические цепи в трехфазных элементах ЭТК УЭЦН считаются симметричными.
3. Питание ЭТК УЭЦН осуществляется системой симметричных синусоидальных напряжений.
4. Питающий кабель по всей длине однороден, т. е. не учитывается соединение между отдельными секциями.
5. Воздушный зазор в расточке статора равномерен, поверхности статора и ротора в зоне воздушного зазора гладкие (т. е. без зубцов и пазов), отсутствуют эксцентриситеты расточки статора и поверхности ротора.
6. Реальная распределенная обмотка ПЭД заменяется сосредоточенной.
7. Поверхности статора и ротора в зоне воздушного зазора гладкие, намагничивающие силы обмоток и поля распределены вдоль окружности воздушного зазора синусоидально.
8. Пренебрегаем высшими пространственными гармониками магнитного поля.
9. Принимаем число витков обмоток статора и ротора одинаковым.

На сегодняшний день питание УЭЦН, как правило, осуществляется посредством станции управления с преобразователем частоты с промежуточным звеном постоянного тока. Автономный инвертор напряжения работает в режиме широтно-импульсной модуляции. На выходе станции управления устанавливается синусный фильтр для подавления высокочастотных компонентов спектра напряжений [12, 13]. Коэффициент полезного действия современных станций управления находится в пределах от 0,95 до 0,98. Поэтому станцию управления в данном исследовании можно представить идеальным источником энергии без потерь мощности.

В электрических цепях, в которых элементы системы (статические нагрузки, статорные цепи электрических машин) трехфазные, с физической точки

зрения естественным является составление уравнений переходных процессов в неподвижной трехфазной системе координат А, В, С. В этом случае система напряжений имеет вид:

$$\begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = \sqrt{2}U \begin{bmatrix} \sin(\omega \cdot t) \\ \sin\left(\omega \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \end{bmatrix},$$

где  $U$  – действующее значения напряжения для каждой фазы источника питания;  $\omega$  – угловая частота напряжения питания,  $\omega = 2\pi f$ ;  $f$  – частота напряжения источника питания;  $t$  – время.

В качестве питающих трансформаторов УЭЦН, как правило, используются повышающие трехфазные двухобмоточные трансформаторы марки ТМПН со схемой соединения обмоток  $Y_n/Y_n-0$ . В редких случаях используется схема соединения обмоток  $Y_n/Y_n-0$ . При принятых допущениях для симметричных систем сумма потоков от каждой фазы равна нулю:

$$\bar{\Phi}_a + \bar{\Phi}_b + \bar{\Phi}_c = 0,$$

где  $\bar{\Phi}_a, \bar{\Phi}_b, \bar{\Phi}_c$  – векторы магнитных потоков фазы А, В, С соответственно.

В конструкции трансформаторов ТМПН используется плоский стержневой магнитопровод, который обладает малой магнитной асимметрией и приводит к несимметрии намагничивающих токов. Тем не менее из-за малости токов намагничивания в сравнении с токами нагрузки данную несимметрию можно не учитывать. Принятое допущение незначительно влияет на определение симметричных переходных процессов, к которым относится отключение источника питания. В этом случае трехфазный двухобмоточный трансформатор можно представить тремя однофазными трансформаторами [11, 13–15]. Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа в матричной форме с учетом принятых допущений:



$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \mathbf{u}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{A}_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{i}_1 \\ \mathbf{i}_2 \\ \mathbf{i}_3 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$  – субматрицы напряжений и токов;  $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3$  – субматрицы сопротивлений.

Здесь  $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \mathbf{i}_1, \mathbf{i}_2, \mathbf{i}_3$  – вектор-столбцы:

$$\mathbf{u}_1 = \begin{bmatrix} u_{11}(t) \\ -u_{12}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} u_{21}(t) \\ -u_{22}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_3 = \begin{bmatrix} u_{31}(t) \\ -u_{32}(t) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{i}_1 = \begin{bmatrix} i_{11}(t) \\ i_{12}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_2 = \begin{bmatrix} i_{21}(t) \\ i_{22}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_3 = \begin{bmatrix} i_{31}(t) \\ i_{32}(t) \end{bmatrix},$$

где  $u, i$  – мгновенные напряжения и токи первичной и вторичной обмоток эквивалентирующих однофазных трансформаторов соответственно.

Запишем выражения для входящих в уравнение (1) сложных матриц сопротивлений:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} r_{11} + \frac{d}{dt}L_{11} & -\frac{d}{dt}M_{1,12} \\ -\frac{d}{dt}M_{1,21} & r_{12} + \frac{d}{dt}L_{12} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} r_{21} + \frac{d}{dt}L_{21} & -\frac{d}{dt}M_{2,12} \\ -\frac{d}{dt}M_{2,21} & r_{22} + \frac{d}{dt}L_{22} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} r_{31} + \frac{d}{dt}L_{31} & -\frac{d}{dt}M_{3,12} \\ -\frac{d}{dt}M_{3,21} & r_{32} + \frac{d}{dt}L_{32} \end{bmatrix},$$

где  $r, L$  – активное сопротивление и полные индуктивности соответствующих обмоток;  $M$  – взаимная индуктивность первичной и вторичной обмоток соответствующих однофазных трансформаторов.

Полные индуктивности определяются суммой взаимной индуктивности обмоток  $M$  и взаимной индуктивностью рассеяния  $L_\sigma$  [11]:

$$L = M + L_\sigma.$$

Если принять, что реактивная составляющая тока холостого хода на порядок больше активной составляющей, то последней можно пренебречь. В этом случае взаимная индуктивность обмоток определяется по выражению:

$$M = \frac{\Psi_{0m}}{\sqrt{2}I_0} = \frac{w \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}I_0},$$

где  $\Psi_{0m}, \Phi_m$  – амплитуда потокоцепления и магнитного потока соответственно;  $I_0$  – действующее значение тока холостого хода;  $w$  – число витков обмотки трансформатора.

Индуктивности рассеяния обмоток определим следующим образом:

$$L_{\sigma 1} = \frac{\Psi_{\sigma 1}}{i_1 - i_0}, \quad L_{\sigma 2} = \frac{\Psi_{\sigma 2}}{i_2},$$

где  $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$  – индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток соответственно;  $i_0$  – ток намагничивания;  $\Psi_{\sigma 1}, \Psi_{\sigma 2}$  – потокоцепление первичной и вторичной обмоток.

Кабельная линия в электротехническом комплексе УЭЦН предназначена для передачи электрической энергии от питающего трансформатора к погружному

электродвигателю и внутрискважинному компенсатору реактивной мощности. Кабельная линия может быть представлена схемой замещения с распределенными или с сосредоточенными параметрами. В первом случае линия описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных, во втором случае – обыкновенными дифференциальными уравнениями.

В работе [16] авторами предложен метод, позволяющий произвести замену кабельной линии с распределенными параметрами многозвенной схемой замещения с сосредоточенными параметрами. Проведена оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля марки КПБК-90 3х16 на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики. Определено оптимальное количество звеньев редуцированной модели в количестве 50 каскадно-соединённых четырёхполюсников [17]. При этом ошибка в полученных данных не превышает 0,1 % по сравнению с эталонной моделью, представленной линией с распределёнными параметрами. Переход от модели кабельной линии с распределёнными параметрами к модели линии с сосредоточенными параметрами позволяет произвести расчет переходных процессов в ЭТК УЭЦН при изменении режимов работы и значительном снижении времени моделирования.

Запишем редуцированную математическую модель одной жилы ненагруженного кабеля в трехфазной системе координат в матричной форме [17]:

$$\mathbf{u}_{in} = \left( \mathbf{r} + \mathbf{L} \frac{d}{dt} \right) \mathbf{i}_{in} + \mathbf{u}_{out}, \quad (2)$$

$$\mathbf{i}_{in} = \left( \mathbf{C} \frac{d}{dt} + \mathbf{g} \right) \mathbf{u}_{out} + \mathbf{i}_{out}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{u}_{in}, \mathbf{u}_{out}$  – вектор-столбцы входных и выходных напряжений  $i$ -го звена схемы замещения кабельной линии;  $\mathbf{i}_{in}, \mathbf{i}_{out}$  – вектор-столбцы входных и выходных токов  $i$  звена схемы замещения кабельной линии;  $i$  – количество звеньев,  $i=1..n$ ;  $n=50$ ;  $\mathbf{r}, \mathbf{L}, \mathbf{C}, \mathbf{g}$  – диагональная матрица  $n$ -ого порядка активных сопротивлений токоведущих жил, индуктивность токоведущих жил, эквивалентная емкость фазы относительно двух других фаз и брони, проводимость изоляции соответственно.

Вектор-столбцы  $\mathbf{u}_{in}, \mathbf{u}_{out}, \mathbf{i}_{in}, \mathbf{i}_{out}$ :

$$\mathbf{u}_{in} = \begin{bmatrix} u_{in}(t) \\ u_i(t) \\ \vdots \\ u_{i-1}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_{out} = \begin{bmatrix} u_i(t) \\ u_{i-1}(t) \\ \vdots \\ u_{out}(t) \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{i}_{in} = \begin{bmatrix} i_1(t) \\ \vdots \\ i_i(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_{out} = \begin{bmatrix} i_2(t) \\ \vdots \\ i_{i+1}(t) \end{bmatrix},$$

где  $u(t), i(t)$  – мгновенные напряжения и токи на входе и выходе  $i$ -го звена.

При принятых допущениях запишем выражения для входящих в уравнения (2) и (3) матриц параметров:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & r_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & r_i \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{L_{cab}}{n} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{L_{cab}}{n} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{L_{cab}}{n} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{C_{cab}}{n} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{C_{cab}}{n} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{C_{cab}}{n} \end{bmatrix}, \mathbf{g} = \begin{bmatrix} \frac{g_{cab}}{n} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{g_{cab}}{n} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{g_{cab}}{n} \end{bmatrix},$$

где  $r_i$  – активное сопротивление токоведущих жил  $n$ -звена редуцированной модели кабельной линии;  $L_{cab}$ ,  $C_{cab}$ ,  $g_{cab}$  – индуктивность токоведущих жил, эквивалентная емкость фазы относительно двух других фаз и брони, проводимость изоляции кабельной линии соответственно.

На практике температура по глубине скважины непостоянна, что в свою очередь влияет на изменение активного сопротивления по длине кабельной линии. Если учесть, что  $n$ -звену редуцированной модели соответствует определенный участок кабельной линии вдоль скважины, то активное сопротивление токоведущих жил на данном участке предлагается определять по общеизвестному выражению [2]:

$$r_i = \rho \cdot \frac{l_i}{S_i} \cdot [1 + 0,004 \cdot (\bar{T}_i - 20)],$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника при температуре плюс 20 °C;  $l_i = l_{cab}/n$  – длина  $i$ -го звена редуцированной модели;  $l_{cab}$  – длина кабельной линии;  $S_i$  – сечение токоведущей жилы  $i$ -го звена редуцированной модели;  $\bar{T}_i$  – среднее значение температуры на  $i$ -м участке.

Внутрискважинный компенсатор реактивной мощности в электротехническом комплексе УЭЦН предназначен для компенсации реактивной составляющей мощности погружного асинхронного электродвигателя. ВКРМ выполнен в виде прочного герметичного корпуса (рис. 1) с возможностью соединения с погружным электродвигателем. Внутри корпуса установлен высокотемпературный трехфазный конденсатор, фазы которого соединены по схеме «треугольник». В современных косинусных конденсаторах удельные потери активной мощности (тепловые потери), обусловленные вязким трением дипольных молекул и другими причинами, не превышают 0,5 Вт на 1000 ВАр. В связи с этим активное сопротивление ВКРМ можно не учитывать при составлении математической модели. Принятое допущение незначительно влияет на точность определения переходных процессов. Запишем систему уравнений по I и II законам Кирхгофа, описывающим переходные процессы в ВКРМ в матричной форме:

$$C \frac{d}{dt} \mathbf{u} = \mathbf{A} \mathbf{i}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{u}$  – вектор-столбец входных напряжений на ВКРМ;  $\mathbf{i}$  – вектор-столбец линейных и фазных токов ВКРМ;  $\mathbf{A}$  – квадратная матрица шестого порядка;  $C$  – суммарная емкость конденсаторов ВКРМ.

При принятых допущениях запишем выражения для входящих в уравнение (4) матриц параметров:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ u_{C.ab}(t) \\ u_{C.bc}(t) \\ u_{C.ca}(t) \end{bmatrix}, \mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_{C.A}(t) \\ i_{C.B}(t) \\ i_{C.C}(t) \\ i_{C.ab}(t) \\ i_{C.bc}(t) \\ i_{C.ca}(t) \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $u_{C.ab}$ ,  $u_{C.bc}$ ,  $u_{C.ca}$  – мгновенные значения напряжений между соответствующими фазами ВКРМ;  $i_{C.A}$ ,  $i_{C.B}$ ,  $i_{C.C}$ ,  $i_{C.ab}$ ,  $i_{C.bc}$ ,  $i_{C.ca}$  – линейные и фазные токи ВКРМ соответственно.

Для описания электрохимических процессов в погружном асинхронном электродвигателе целесообразно использовать неподвижную систему координат  $\alpha$ ,  $\beta$ , жестко связанную со статором. При этом для систем с незаземленными нулевыми точками аналитическая зависимость между составляющими  $\alpha$ ,  $\beta$  и мгновенными значениями напряжений симметричной трехфазной системы А, В, С в матричной форме имеет вид:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{ab}(t) \\ u_{bc}(t) \\ u_{ca}(t) \end{bmatrix},$$

где  $u_\alpha(t)$ ,  $u_\beta(t)$ ,  $u_c(t)$  – мгновенные значения фазных напряжений;  $u_a(t)$ ,  $u_b(t)$  – фазные напряжения эквивалентной двухфазной обмотки статора;  $K$  – коэффициент преобразования, при  $K=2/3$  преобразование осуществляется с равной амплитудой, при  $K=\sqrt{2}/3$  активная и реактивная мощности, рассчитанные в новой системе, имеют те же значения, что и в исходной системе.

Обратное преобразование осуществляется в соответствии с матричным выражением:

$$\begin{bmatrix} u_{ab}(t) \\ u_{bc}(t) \\ u_{ca}(t) \end{bmatrix} = K^{-1} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 \\ -\frac{1}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \end{bmatrix}.$$

Аналогичные преобразования для других переменных электрических величин осуществляются путем соответствующей замены.

Математическая модель погружного асинхронного электродвигателя в неподвижной системе координат  $\alpha$ ,  $\beta$ , выраженная через ток статора и потокосцепление ротора, в матричной форме имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \mathbf{L} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}_r \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \Psi_r \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left( \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_r} z_p \Psi_r^T \cdot \mathbf{i}_s \cdot \mathbf{D} - T_m(\omega) \right), \quad (6)$$

где  $\mathbf{u}_s$ ,  $\mathbf{i}_s$ ,  $\Psi_r$  – субматрицы проекций векторов напряжений и токов статора, потокоцепления ротора на оси  $\alpha$ ,  $\beta$ ;  $\mathbf{L}$  – диагональная матрица индуктивностей;  $\mathbf{B}$  – матрица коэффициентов;  $\omega$  – угловая частота вращения ротора;  $L_r$  – полная индуктивность обмотки ротора;  $L_m$  – результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре машины;  $T_m(\omega)$  – момент статического сопротивления на валу двигателя, включая собственный момент трения двигателя;  $J$  – момент инерции, приведенный к валу двигателя;  $z_p$  – число пар полюсов машины;

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Уравнение (5) описывает электрическую часть машины, уравнение (6) – механическую. В (5) и (6) каждый элемент сложной матрицы-субматрицы. Здесь  $\mathbf{u}_s$ ,  $\mathbf{u}_r$ ,  $\mathbf{i}_s$ ,  $\Psi_r$  – вектор-столбцы:

$$\mathbf{u}_s = \begin{bmatrix} u_{sa}(t) \\ u_{s\beta}(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_{sa}(t) \\ i_{s\beta}(t) \end{bmatrix}, \quad \Psi_r = \begin{bmatrix} \Psi_{ra}(t) \\ \Psi_{r\beta}(t) \end{bmatrix},$$

где  $u_{sa}(t) = U_{sm} \cos(2\pi f t)$  – косинусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси  $\alpha$ ;  $u_{s\beta}(t) = U_{sm} \sin(2\pi f t)$  – синусоидальная по форме составляющая напряжения статора по оси  $\beta$ ;  $U_{sm}$  – амплитудное значение фазного напряжения статорной обмотки;  $f$  – частота питающего напряжения;  $i_{sa}(t)$ ,  $i_{s\beta}(t)$  – составляющие тока статора в системе координат  $\alpha$ ,  $\beta$ ;  $\Psi_{ra}(t)$ ,  $\Psi_{r\beta}(t)$  – составляющие потокоцепления ротора в системе координат  $\alpha$ ,  $\beta$ .

Запишем выражения для входящих в уравнение (5) матриц параметров:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{eq}}{\sigma L_s} & 0 & \frac{R'_r L_m}{\sigma L_s L_r} & \omega \cdot \frac{L_m z_p}{\sigma L_s L_r} \\ 0 & -\frac{R_{eq}}{\sigma L_s} & -\omega \cdot \frac{L_m z_p}{\sigma L_s L_r} & \frac{R'_r L_m}{\sigma L_s L_r} \\ \frac{R'_r L_m}{L_r} & 0 & -\frac{R'_r}{L_r} & -z_p \omega \\ 0 & \frac{R'_r L_m}{L_r} & z_p \omega & -\frac{R'_r}{L_r} \end{bmatrix},$$

где  $L_s$  – полная индуктивность обмотки статора;  $R'_r$  – приведенное к статору сопротивление обмотки ротора;  $R_{eq}$  – эквивалентное активное сопротивление;  $\sigma$  – коэффициент рассеяния.

Полные индуктивности обмоток статора и ротора, эквивалентное активное сопротивление, а также коэффициент рассеяния определяются по выражениям:

$$\begin{aligned} L_s &= L_{1\sigma} + L_m, \\ L_r &= L'_{2\sigma} + L_m, \\ R_{eq} &= R_s + R'_r \cdot (L_m / L_r)^2, \\ \sigma &= 1 - L_m^2 / (L_s \cdot L_r), \end{aligned}$$

где  $L_{1\sigma}$  и  $L'_{2\sigma}$  – индуктивность рассеяния обмотки статора и приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора.

В общем случае выражение для механического полного момента сопротивления на валу электродвигателя имеет вид:

$$T_m(\omega) = a_k \cdot T_k + (1 + b_k) T_k \left( \frac{\omega}{\omega_{nom}} \right)^\gamma,$$

где  $T_k$  – полезный момент;  $a_k$ ,  $b_k$  – коэффициенты постоянных и переменных потерь насосной нагрузки в режиме работы с постоянным значением коэффициента полезного действия;  $\omega_{nom}$  – угловая частота вращения ротора электродвигателя в номинальном режиме;  $\gamma$  – показатель степени, характеризующий нагрузку,  $\gamma=2$  для насосной нагрузки [18].

Для (1)–(6) запишем матрицы связей напряжений и токов в неподвижной системе координат  $\alpha$ ,  $\beta$ :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_\alpha(t) \\ u_\beta(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} u_{1T\alpha}(t) \\ u_{1T\beta}(t) \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} u_{2T\alpha}(t) \\ u_{2T\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{ina}(t) \\ u_{in\beta}(t) \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} u_{out\alpha}(t) \\ u_{out\beta}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} u_{c\alpha}(t) \\ u_{c\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sa}(t) \\ u_{s\beta}(t) \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_{2T\alpha}(t) \\ i_{2T\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ina}(t) \\ i_{in\beta}(t) \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} i_{out\alpha}(t) \\ i_{out\beta}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} i_{c\alpha}(t) \\ i_{c\beta}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{sa}(t) \\ i_{s\beta}(t) \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

где  $u_\alpha(t) = U_a \cos(2\pi f t)$  – косинусоидальная по форме составляющая напряжения источника питания по оси  $\alpha$ ;  $u_\beta(t) = U_\beta \sin(2\pi f t)$  – синусоидальная по форме составляющая напряжения источника питания по оси  $\beta$ ;  $u_{1T\alpha}(t)$ ,  $u_{1T\beta}(t)$ ,  $u_{2T\alpha}(t)$ ,  $u_{2T\beta}(t)$ ,  $u_{ina}(t)$ ,  $u_{in\beta}(t)$ ,  $u_{out\alpha}(t)$ ,  $u_{out\beta}(t)$ ,  $u_{c\alpha}(t)$ ,  $u_{c\beta}(t)$  – напряжения на первичной и вторичной обмотках трансформатора, на входе и выходе кабельной линии, на внутрискважинном компенсаторе в системе координат  $\alpha$ ,  $\beta$  соответственно;  $i_{2T\alpha}(t)$ ,  $i_{2T\beta}(t)$ ,  $i_{ina}(t)$ ,  $i_{in\beta}(t)$ ,  $i_{out\alpha}(t)$ ,  $i_{out\beta}(t)$ ,  $i_{c\alpha}(t)$ ,  $i_{c\beta}(t)$  – токи вторичной обмотки трансформатора, на входе и выходе кабельной линии, в внутрискважинном компенсаторе в системе координат  $\alpha$ ,  $\beta$  соответственно.

Решение задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) применительно к данному исследованию выполнено численными методами. Численные методы основаны на алгоритмах вычисления приближенных значений искомого решения функции  $u(x)$  на некоторой выбранной сетке значений аргумента [19–23]:

$$\frac{du_i(x)}{dx} = f_i(x, u_1, u_2, \dots, u_n), \quad u_i(x_0) = u_i^{(0)}, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

где  $i$  – количество точек.

Суть метода заключается в переходе от бесконечно малых приращении в уравнении (системам ОДУ) (9) к конечным:

$$\frac{du}{dx} = f(x, u) \quad (7)$$

при  $x > x_0$ ,  $u(x_0) = u_0$ ,  $x = x_i$ .

Покрывается область определения решения  $D$  функции и (ось аргумента  $x$ ) сеткой  $\zeta_h$  равноотстоящих точек, начиная от начальной точки:  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_i$ . Расстояния между точками считаются равными  $h = x_i - x_{i-1} = \text{const}$ . Вводятся сеточные функции  $u_i = u(x_i)$ ;  $y_i = y(x_i)$ ;  $f_i = f(x_i, y_i)$ , определенные в узлах сетки  $\zeta_h$ , то есть в точках  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_i$ . Функции  $y_i, f(x_i, y_i)$  соответствуют численному решению разностной задачи, а  $u(x_i)$  – решению дифференциальной задачи (7).

Предполагая, что известно значение  $y_i$  в точке  $x_i$  и заменяя производную  $u'(x_i)$  в уравнении  $u' = f(x, u)$  выражением  $u'(x_i) = (y_{i+1} - y_i)/h$ ,  $u(x_i)$  в функции  $f(x, u)$  через  $y_i$ , получим разностное уравнение:

$$\frac{y_{i+1} - y_i}{h} = f(x_i, y_i),$$

где  $h$  – шаг интегрирования.

В общем случае формула Эйлера имеет вид:

$$y_{i+1} = y_i + h \cdot f(x_i, y_i), \quad i = 1, 2, \dots, I.$$

#### Результаты моделирования

В качестве объекта исследования принят электротехнический комплекс УЭЦН, оснащенный погружным асинхронным электродвигателем марки ЭД-63-117, внутрискважинным компенсатором реактивной мощности марки ВКРМ-125-117, кабельной линией длиной 2000 м и питающим трансформатором марки ТМПН-160/3.

**Таблица 1.** Параметры трансформатора ТМПН-160/3

**Table 1.** Parameters of transformer TMPN-160/3

Параметр/Parameter	Значение/Value	
	Обмотка НН LV winding	Обмотка ВН HV winding
Номинальное напряжение, В Rated voltage, V	380	1250
Номинальная полная мощность, ВА Rated apparent power, VA	160000	
Потери короткого замыкания, Вт Short circuit losses, W	2650	
Потери холостого хода, Вт No-load losses, W	440	
Напряжение короткого замыкания Short circuit voltage, %	5,5	
Ток холостого хода/No-load current, %	1,7	
Активное сопротивление обмотки, Ом Active resistance of the winding, Ohm	0,022	0,243
Индуктивность обмотки, Гн Inductance of the winding, H	$3,387 \cdot 10^{-5}$	$3,665 \cdot 10^{-4}$
Активное сопротивление контура намагничивания, Ом Active resistance of the magnetizing circuit, Ohm	278,776	
Индуктивность контура намагничивания, Гн Inductance of the magnetization circuit, H	1,599	

Параметры трансформатора ТМПН приведены в табл. 1 и приведены к обмотке высшего напряжения. Расчет параметров схемы замещения произведен по методике, изложенной в [24, 25].

В качестве питающего кабеля выбран погружной бронированный кабель марки КРБК-90 3х16 [17] (табл. 2).

**Таблица 2.** Параметры нефтепогружного кабеля КРБК-90 3х16 [17]

**Table 2.** Parameters of the oil submersible cable KPBK-90 3х16 [17]

Погонная ёмкость, $C_0$ , Ф/км Linear capacity, $C_0$ , F/km	Погонная индуктивность, $L_0$ , Гн/км Linear inductance, $L_0$ , H/km	Погонная проводимость, $g_0$ , См/км Linear conductivity, $g_0$ , $\Omega^{-1}$ /km	Погонное сопротивление, $r_0$ , Ом/км Linear resistance, $r_0$ , $\Omega$ /km
$2,125 \cdot 10^{-7}$	$300,676 \cdot 10^{-6}$	$10^{-6}$	1,204

Средняя температура токопроводящей жилы кабеля принята плюс 50 °С для одного звена редуцированной модели.

Реактивная мощность ВКРМ составляет 35 кВАр при номинальном напряжении 1040 В и частоте 50 Гц. Суммарная емкость ВКРМ после эквивалентных преобразованиях составляет  $C = 3 \times 34,35 \cdot 10^{-6}$  Ф.

Параметры погружного асинхронного электродвигателя марки ЭД-63-117 приведены в табл. 3 и верифицированы с протоколами стендовых испытаний [26, 27]. Авторами показано, что в номинальном режиме отклонение расчетных значений потребляемого тока от экспериментальных данных составляет 0,9 % для потребляемой активной мощности минус 0,1 %. Максимальная относительная погрешность с учетом допустимых погрешностей измерений на испытательных стендах (не более 0,5 %), соответствующая области малых нагрузок (40 % от номинальной нагрузки), составляет для тока 3,0 % и уменьшается с увеличением нагрузки до 0,9 % [26].

**Таблица 3.** Параметры модели погружного асинхронного электродвигателя ЭД-63-117 [26, 27]

**Table 3.** Parameters of the submersible induction motor model ED-63-117 [26, 27]

Параметр Parameter	Значение Value
Номинальное напряжение, В/Rated voltage, V	1040
Номинальная полная мощность, ВА Rated apparent power, VA	88757
Активное сопротивление обмотки статора, Ом Active resistance of the stator winding, Ohm	1,0
Индуктивность обмотки статора, Гн Inductance of the stator winding, H	$3,17 \cdot 10^{-3}$
Приведенное активное сопротивление обмотки ротора, Ом Reduced active resistance of the rotor winding, Ohm	0,676
Приведенная индуктивность обмотки ротора, Гн Reduced inductance of the rotor winding, H	$3,17 \cdot 10^{-3}$
Индуктивность контура намагничивания, Гн Inductance of the magnetization circuit, H	$67,0 \cdot 10^{-3}$
Момент инерции ротора, кг·м <sup>2</sup> Moment of rotor's inertia, kg·m <sup>2</sup>	0,11
Коэффициент трения, Н·м·с Friction coefficient, N·m·s	0,022

Анализ совокупности собственных чисел элементарных подсистем электротехнического комплекса УЭЦН показывает, что решаемая задача Коши по критерию времени и точности счета позволяет применить метод Эйлера. При принятых параметрах электротехнического комплекса УЭЦН и рациональном шаге интегрирования он обеспечивает достаточную точность при приемлемых затратах вычислительных ресурсов. Шаг интегрирования выбран на основе анализа корней характеристического уравнения. Максимально возможный шаг дискретизации по времени определяется в соответствии с величиной удвоенной частоты Найквиста, которая определяется максимальной мнимой частью корня характеристического уравнения. При моделировании переходных процессов шаг интегрирования принят с запасом  $h=2 \cdot 10^{-7}$  с целью повышения детализации переходного процесса, количество точек  $i=5 \cdot 10^6$ .

Отключение источника питания произведено в момент времени 0,5 с, когда погружной электродвигатель работал в установившемся режиме.

На рис. 3 приведены зависимости фазных токов источника питания от момента пуска погружного асинхронного электродвигателя до вывода в установившейся режим работы. Амплитуда тока 683,6 А в режиме пуска, в установившемся режиме 212,2 А.

На рис. 4 приведены зависимости фазных токов погружного электродвигателя в режиме пуска (рис. 4, а) и при отключении источника питания (рис. 4, б). В момент пуска амплитудное значение тока ПЭД составляет 216,3 А, в установившемся режиме – 70,7 А. Согласно законам коммутации, ток в индуктивности

(в нашем случае в обмотках статора ПЭД) не может измениться мгновенно (скачкообразно), что согласуется с характеристикой переходного процесса. Характеристики токов статора имеют колебательный характер, затухающий по амплитуде. Колебательный характер вызван обменом энергией между конденсатором ВКРМ, кабельной линией и погружным электродвигателем. Периодический обмен энергией продолжается до тех пор, пока накопленная энергия не рассеется в виде тепла на активном сопротивлении участка ЭТК после коммутации.

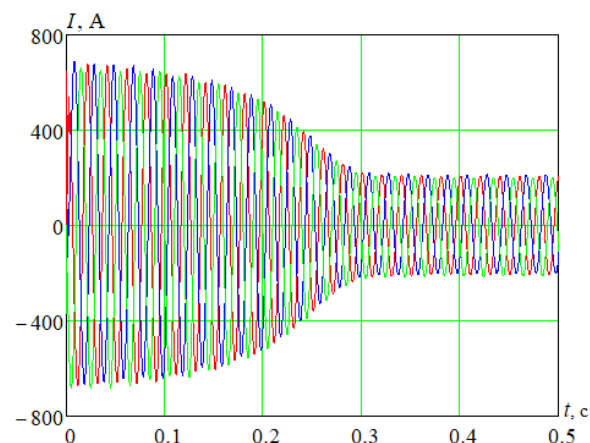


Рис. 3. Токи в первичной обмотке повышающего трансформатора (фаза А – красный; фаза В – синий; фаза С – зеленый)

Fig. 3. Currents in the primary winding of a step-up transformer (phase A – red; phase B – blue; phase C – green)

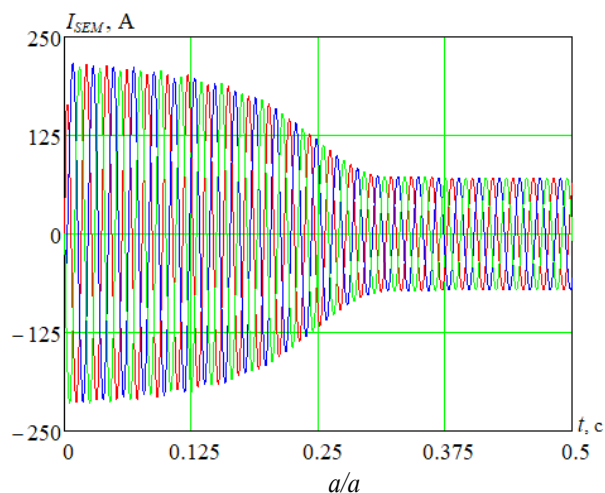


Рис. 4. Зависимости тока статора ПЭД от времени (фаза А – красный; фаза В – синий; фаза С – зеленый): а) в режиме пуска; б) при отключении источника питания

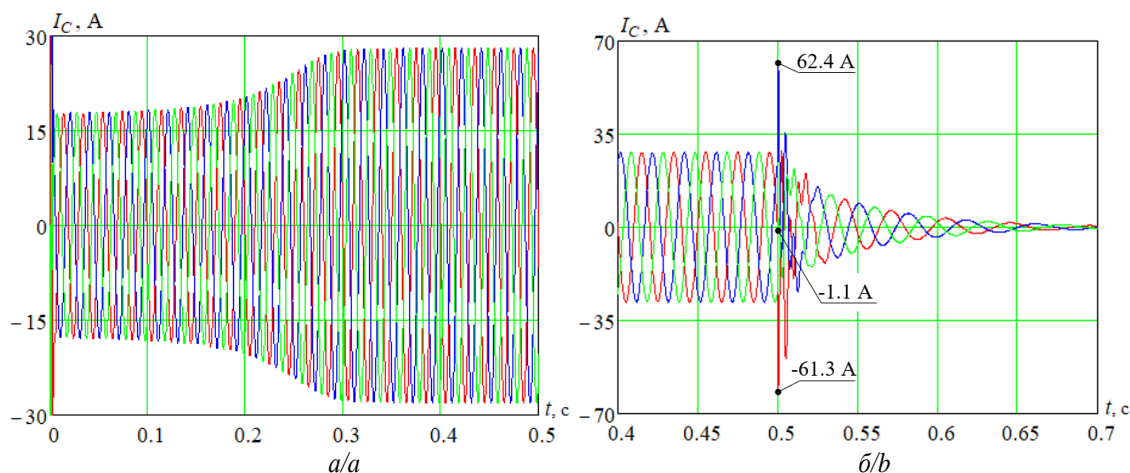
Fig. 4. Dependences of the stator current SEM on time (phase A – red; phase B – blue; phase C – green): a) in the start mode; b) when the power supply is turned off

На рис. 5 приведены зависимости линейных токов внутрискважинного компенсатора в режиме пуска ПЭД (рис. 5, а) и при отключении источника питания (рис. 5, б). Анализ кривой (рис. 5, б) показал, что в момент отключения источника питания происходит бросок тока внутрискважинного ком-

пенсатора. Амплитудные значения линейных токов ВКРМ до отключения источника питания – 28,1 А. После отключения источника питания амплитудное значение тока фазы А равно 61,3 А, фазы В – 62,4 А, фазы С – минус 1,1 А. Изменение тока ВКРМ при переходном процессе имеет колебательный характер

и затухает по амплитуде. Максимальный бросок тока ВКРМ наблюдается в момент отключения, при

котором мгновенное значение тока ПЭД равно амплитудному.

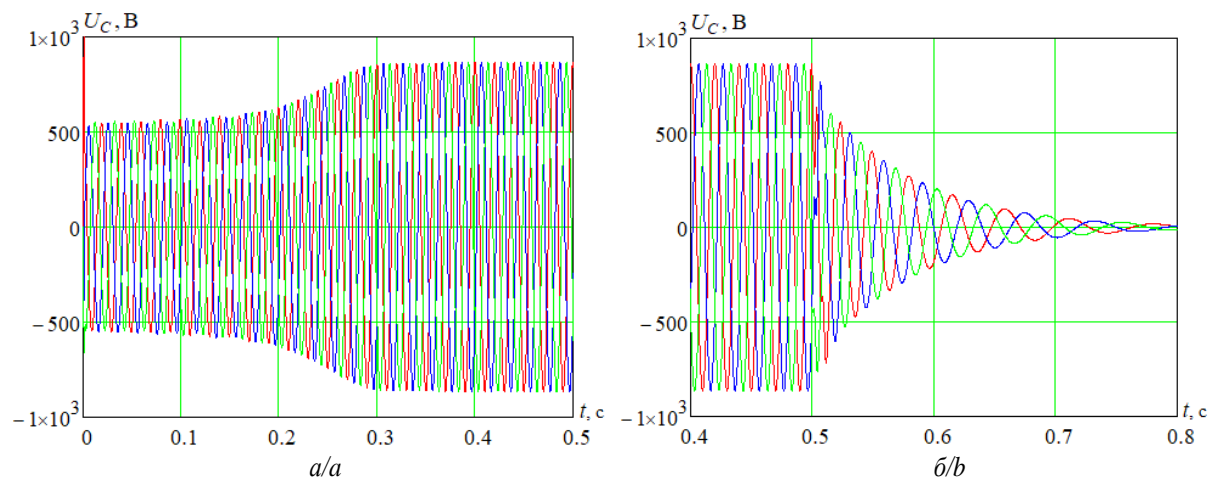


**Рис. 5.** Зависимости тока ВКРМ от времени (фаза А – красный; фаза В – синий; фаза С – зеленый): а) в режиме пуска ПЭД; б) при отключении источника питания

**Fig. 5.** Dependences of the DRPC current on time (phase A – red; phase B – blue; phase C – green): a) in SEM start mode; b) when the power supply is turned off

На рис. 6 приведены зависимости фазных напряжений на внутрискважинном компенсаторе в режиме пуска ПЭД (рис. 6, а) и при отключении источника питания (рис. 6, б). Согласно законам коммутации, напряжение на емкостном элементе (в нашем случае на конденсаторе ВКРМ) не может измениться мгновенно

(скачкообразно), что согласуется с характеристикой переходного процесса. Амплитудные значения фазных напряжений на ВКРМ до и после отключения источника питания составляют 864,5 В. Изменение напряжения на ВКРМ при переходном процессе имеет колебательный характер и затухает по амплитуде.



**Рис. 6.** Зависимости фазных напряжений на ВКРМ от времени (фаза А – красный; фаза В – синий; фаза С – зеленый): а) в режиме пуска ПЭД; б) при отключении источника питания

**Fig. 6.** Dependences of phase voltages on DRPC from time (phase A – red; phase B – blue; phase C – green): a) in the start mode; b) when the power supply is turned off

На рис. 7, 8 приведены зависимости угловой скорости ротора и электромагнитного момента на валу погружного асинхронного электродвигателя соответственно. Показан промежуток времени при пуске и выбеге.

Анализ электромеханических характеристик показал, что электромагнитный момент погружного электродвигателя в установившемся режиме составляет 205,6 Н·м. В момент переходного процесса электромагнитный момент снижается до нуля. За счет меха-

нической инерции частота вращения ротора при отключении источника питания плавно снижается.

Полученные результаты переходных процессов позволили установить причину ложных срабатываний устройств защиты внутрискважинных компенсаторов реактивной мощности и выработать комплекс мер по их предотвращению. Времятоковые зависимости устройств защиты ВКРМ необходимо дополнительно исследовать с учетом специфики оборудования электротехнического комплекса.



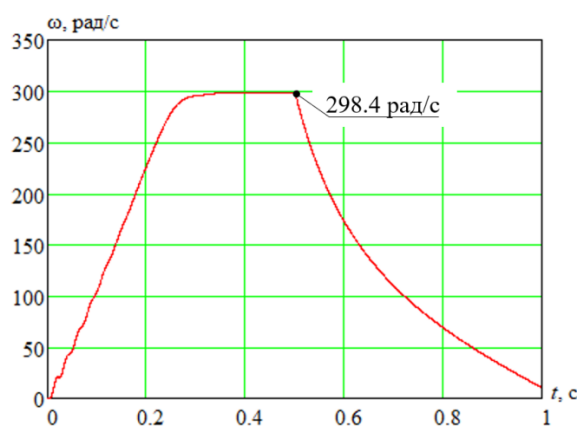


Рис. 7. Частота вращения ротора погружного электродвигателя

Fig. 7. Rotor speed of submersible induction motor

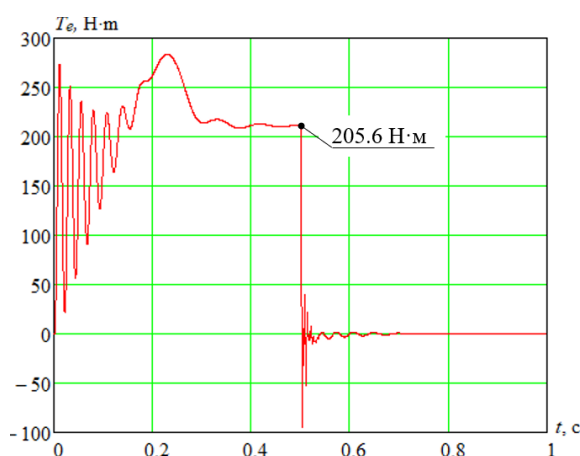


Рис. 8. Электромагнитный момент на валу ПЭД

Fig. 8. Electromagnetic torque on the shaft of submersible induction motor

### Обсуждение результатов

На основании исследования предложены мероприятия по снижению количества ложных срабатываний

устройств защиты внутрискважинного компенсатора реактивной мощности:

1. Установка в схему управления электромеханическим реле токоограничивающих диодов или супрессоров, например, диодов Зенера, для предотвращения перенапряжений, вызванных токами разряда конденсаторов ВКРМ.
2. Согласование уставок электромеханического реле с токами разряда конденсаторов ВКРМ.
3. Настройка алгоритмов отключения станции управления таким образом, чтобы минимизировать фазный ток статора погружного электродвигателя.

### Выводы

1. Разработана математическая модель электротехнического комплекса УЭЦН с внутрискважинным компенсатором реактивной мощности в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши, которая позволяет исследовать динамические и установившиеся режимы работы комплекса.
2. Получены характеристики переходных процессов в элементах электротехнического комплекса УЭЦН при включении и отключении источника питания. Установлено, что в момент времени 0,5 с при отключении источника питания происходит бросок тока ВКРМ в фазе В в 2,21 раза относительно рабочего тока. Максимальный бросок в 2,56 раза тока в одной из фаз наблюдается в момент отключения источника питания, при котором ток соответствующей фазы ПЭД имеет максимальное значение. Данное обстоятельство необходимо учитывать при определении уставок защиты ВКРМ.
3. Разработаны мероприятия по снижению количества ложных срабатываний устройств защиты внутрискважинного компенсатора реактивной мощности.
7. Machado A.P.F., Resende C.Z., Cavaliere D.C. Estimation and prediction of motor load torque applied to electrical submersible pumps // Control Engineering Practice. – 2019. – V. 84. – P. 284–296. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.11.019
8. Аникин В.В. Методика и средства предварительной идентификации параметров модели послеремонтных регулируемых погружных асинхронных электродвигателей: дис. ... канд. техн. наук. – Ханты-Мансийск, 2020. – 182 с.
9. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. – СПб.: Изд-во «Питер», 2010. – 543 с.
10. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2001. – 324 с.
11. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. в двух т. Т. 1. – М.: ИД МЭИ, – 2006. – 652 с.
12. Fuchs E.F., Masoum M.A.S. Chapter 2. Harmonic models of transformers // Power Quality in Power Systems, Electrical Machines, and Power-Electronic Drives 3rd ed. – 2023. – P. 99–196. DOI: 10.1016/B978-0-12-817856-0.00002-9.
13. Pijarski P. Modelling of multi-winding transformers for short-circuit calculations in the power system – modelling accuracy and differences in equivalent circuits // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2023. – V. 148. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.108971.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2021 году. URL: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc-ups/> (дата обращения: 08.06.2022).
2. Вопросы энергоэффективности установок электроприводных центробежных насосов / В.Н. Ивановский, А.А. Сабиров, 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.
3. Fakher S., Khlaifat A., Nameer H. Improving electric submersible pumps efficiency and mean time between failure using permanent magnet motor // Upstream Oil and Gas Technology. – 2022. – V. 9. DOI: 10.1016/j.upstre.2022.100074.
4. Lea J.F., Rowlan L. 12 - Electrical submersible pumps // Gas Well Deliquification. 3rd ed. – 2019. – P. 237–308. DOI: 10.1016/B978-0-12-815897-5.00012-3.
5. Takacs G. Chapter 3. Electrical submersible pump components and their operational features. – Cambridge, Gulf Professional Publ., 2018. – P. 55–152. DOI: 10.1016/B978-0-12-814570-8.00003-9.
6. Внутрискважинные компенсаторы реактивной мощности. Первый опыт / А.В. Фаткин, А.А. Ожегов, В.А. Копырин, А.А. Юкин // Инженерная практика. – 2019. – № 8. – С. 18–26.

14. Пустоветов М.Ю. Опыт разработки синус-фильтра для силовой схемы частотно-регулируемого асинхронного электропривода // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. – С. 87–95.
15. Harmonic sources modeling and characterization in modern power systems: a comprehensive overview / Z. Hu, Y. Han, A.S. Zalhaf, S. Zhou, E. Zhao, P. Yang // Electric Power Systems Research. – 2023. – V. 218. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109234.
16. Определение погонных электротехнических параметров нефтепогружного кабеля / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев, А.В. Лавринович // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 6. – С. 186–197.
17. Оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики / А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 154–167.
18. Лысова О.А., Фрайштетер В.П., Смирнов А.Ю. Анализ способов пуска установок центробежных электронасосов в осложненных условиях // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2018. – № 4. – С. 87–96. DOI: 10.21440/0536-1028-2018-4-87-96.
19. Пантелеев А.В. Обыкновенные дифференциальные уравнения в примерах и задачах. – М.: Изд-во «Высшая Школа», 2001. – 376 с.
20. Hairer E., Wanner G. Solving ordinary differential equations II: stiff and differential-algebraic problems. 2nd revised ed. – Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 614 p.
21. Le Veque R.J. Finite difference methods for ordinary and partial differential equations. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007. – 341 p.
22. Dormand J.R. Numerical methods for differential equations: a computational approach. – Florida: CRC Press, 1996. – 384 p.
23. Rapp B.E. Chapter 27. Numerical methods for solving differential equations // Microfluidics (Second Edition). – 2023. – P. 581–638. DOI: 10.1016/B978-0-12-824022-9.00047-4
24. Семина И.А., Андреева Е.Г. Имитационное моделирование максимальной токовой защиты силового трансформатора в программе Matlab Simulink // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2021. – Т. 17. – № 1. – С. 27–32. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-27-32.
25. Татевосян А.А., Конакбаева К.С. Программное обеспечение по выбору мощности цеховых трансформаторных подстанций // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2013. – № 2. – С. 334–336.
26. Копырин В.А., Портнягин А.Л., Хамитов Р.Н. Пути повышения эффективности установок электроцентробежных насосов добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 155–162.
27. Оценка совокупной стоимости владения установкой электроцентробежного насоса с внутрискважинным компенсатором / В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, И.В. Раков, А.Л. Портнягин, А.А. Маркова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 2. С. 166–175. DOI: 10.18799/24131830/2021/02/3053.

Поступила 15.05.2023 г.

Прошла рецензирование 25.05.2023 г.

#### Информация об авторах

**Глазырин А.С.**, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

**Исаев Ю.Н.**, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Копырин В.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

**Тимошкин В.В.**, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, доцент отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Кладиев С.Н.**, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Хамитов Р.Н.**, доктор технических наук, профессор кафедры электрической техники Омского государственного технического университета; профессор кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

**Ковалев В.З.**, доктор технических наук, профессор Политехнической школы Югорского государственного университета; профессор отделения автоматизации и робототехники Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Лосев Ф.А.**, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

**Леонов А.П.**, кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Попов Е.И.**, ассистент кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

UDC 621.3

## TRANSIENT PROCESSES IN ELECTRICAL COMPLEX OF PRODUCTION WELL WITH DOWNHOLE COMPENSATOR OF REACTIVE POWER

Alexander S. Glazyrin<sup>1,2</sup>,  
asglazyrin@tpu.ru

Yusup N. Isaev<sup>1</sup>,  
isaev@tpu.ru

Vladimir A. Kopyrin<sup>3</sup>,  
kopyrinva@gmail.com

Vadim V. Timoshkin<sup>1</sup>,  
filipas@tpu.ru

Sergey N. Kladiev<sup>1</sup>,  
kladiev@tpu.ru

Rustam N. Khamitov<sup>3,4</sup>,  
apple\_27@mail.ru

Vladimir Z. Kovalev<sup>2,1</sup>,  
vz\_kovalev@mail.ru

Fedor A. Losev<sup>3</sup>,  
losevfa@tyuiu.ru

Andrey P. Leonov<sup>1</sup>,  
leonov\_ap@tpu.ru

Evgeny I. Popov<sup>3</sup>,  
popovai@tyuiu.ru

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

<sup>2</sup> Yugra State University,  
16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

<sup>3</sup> Industrial University of Tyumen,  
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

<sup>4</sup> Omsk State Technical University,  
11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.

**The relevance.** At the present time at routine complication of technological processes to increase efficiency of production processes due to introduction of new equipment the conflicts between functional capabilities of various technical means and their ability to function with specified quality, in specified electromagnetic environment and do not create inadmissible electromagnetic interference to other technical means occur. The electrical engineering complex for oil production includes a combination of ground and submersible electrical equipment assembled for receiving, transforming electrical energy, controlling its flow, converting electrical energy into mechanical energy and transmitting it to a submersible pump, including various electrical and electronic devices: a control station with a frequency converter, a step-up transformer, a cable line, a submersible electric motor, a downhole reactive power compensator and other devices. Any change in the layout of electrical systems for extracting oil or technical characteristics of the equipment used requires careful analysis of transient processes between the operating modes of electrical equipment in order to prevent the risks of false triggering of electrical equipment protection devices.

**The purpose:** analysis of transient processes in the electrical system of the production well with the downhole reactive power compensator when the power supply is disconnected in order to prevent the risks of false operation of the compensator protection devices.

**The object:** section of a power supply system for a cluster of oil producing wells equipped with electric centrifugal pump installations with downhole reactive power compensators.

**Methods:** positions of theoretical bases of electrical engineering, theory of electric drive, theory of differential equations, numerical methods.

**Results.** The authors developed the mathematical model of the electrical system of the submersible unit for oil production with a downhole reactive power compensator, which enables to investigate transient processes in start-up and shutdown mode of the submersible induction motor. Characteristics of transient processes are obtained in elements of electrical complex of submersible plant for oil production when power supply is switched on and disconnected. It is established that the maximum current surge in the downhole reactive power compensator is 2.56 times with the parameters of the electrical system of the production well accepted in the study. The inventive measures for reducing the number of false actuations of the protection devices are also disclosed.

### Key words:

downhole compensator, transient processes, submersible electric centrifugal pump, submersible induction motor, mathematical model.

### REFERENCES

1. *Otchet o funktsionirovani EES Rossii v 2021 godu* [Report on the functioning of the UES of Russia in 2021]. Available at: <https://www.so-ups.ru/functioning/tech-disc/tech-disc-ups/> (accessed 6 August 2022).
2. 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.
3. Fakher S., Khlaifat A., Nameer H. Improving electric submersible pumps efficiency and mean time between failure using permanent magnet motor. *Upstream Oil and Gas Technology*, 2022, vol. 9. DOI: 10.1016/j.upstre.2022.100074.
4. Lea J.F., Rowlan L. 12 – Electrical submersible pumps. *Gas Well Deliquification*. 3<sup>rd</sup> ed. 2019, pp. 237–308. DOI: 10.1016/B978-0-12-815897-5.00012-3.
5. Takacs G. Chapter 3 – Electrical submersible pump components and their operational features. Cambridge, Gulf Professional Publ., 2018. pp. 55–152. DOI: 10.1016/B978-0-12-814570-8.00003-9.

6. Fatkin A.V., Ozhegov A.A., Kopyrin V.A., Yukin A.A. Downhole reactive power compensators. First experience. *Engineering practice*, 2019, no. 8, pp. 18–26. In Rus.
7. Machado A.P.F., Resende C.Z., Cavaliere D.C. Estimation and prediction of motor load torque applied to electrical submersible pumps. *Control Engineering Practice*, 2019, vol. 84, pp. 284–296. DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.11.019.
8. Anikin V.V. *Metodika i sredstva predvaritel'noy identifikatsii parametrov modeli posleremontnykh reguliruemyykh pogruzhnykh asinkhronnykh elektrodvigatelye*. Dis. Kand. nauk [Methods and means of preliminary identification of the parameters of the model of post-repair adjustable submersible asynchronous electric motors. Cand. Diss. Abstract]. Khanty-Mansisk, 2020. 182 p.
9. Voldek A.I., Popov V.V. *Elektricheskie mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electric cars. AC machines]. St. Petersburg, Piter Publ. House, 2010. 543 p.
10. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines. 3<sup>rd</sup> ed., revised and added]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001. 324 p.
11. Ivanov-Smolensky A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electrical machines]. Moscow, MPEI Publ. House, 2006. Vol. 1, 652 p.
12. Fuchs E.F., Masoum M.A.S. Chapter 2 – Harmonic models of transformers. *Power Quality in Power Systems, Electrical Machines, and Power-Electronic Drives*. 3<sup>rd</sup> ed. 2023, pp. 99–196. DOI: 10.1016/B978-0-12-817856-0.00002-9.
13. Pijarski P. Modelling of multi-winding transformers for short-circuit calculations in the power system – modelling accuracy and differences in equivalent circuits. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, vol. 148. DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.108971.
14. Pustovetov M.Yu. Experience in developing sine-wave filter for power circuit of vvvf-drive with induction motor. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 4, pp. 87–95. In Rus.
15. Hu Z., Han Y., Zalhaf A.S., Zhou S., Zhao E., Yang P. Harmonic sources modeling and characterization in modern power systems: a comprehensive overview. *Electric Power Systems Research*, 2023, vol. 218. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109234.
16. Glazyrin A.S. Determination of running electrical characteristics of oil submersible cable. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 6, pp. 186–197. In Rus.
17. Glazyrin A.S. Unloaded oil-submersible cable reduced dynamic model order optimization based on the frequency response approximation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 154–167. In Rus.
18. Lysova O.A., Fraishteter V.P., Smirnov A.Yu. Centrifugal electric pumps units startup methods analysis in abnormal operating conditions. *News of higher educational institutions. Mining magazine*, 2018, no. 4, pp. 87–96. In Rus.
19. Panteleev A.V. *Obyknovennyye differentsialnye uravneniya v primerakh i zadachakh* [Ordinary differential equations in examples and tasks]. Moscow, Vysshaya shkola Publ. House, 2001. 376 p.
20. Hairer E., Wanner G. *Solving ordinary differential equations II: stiff and differential-algebraic problems*. 2<sup>nd</sup> revised ed. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2010. 614 p.
21. Le Veque R.J. *Finite difference methods for ordinary and partial differential equations*. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2007. 341 p.
22. Dormand J.R. *Numerical methods for differential equations: a computational approach*. Florida, CRC Press, 1996. 384 p.
23. Rapp B.E. Chapter 27 – Numerical methods for solving differential equations. 2<sup>nd</sup> ed. *Microfluidics*, 2023. pp. 581–638. DOI: 10.1016/B978-0-12-824022-9.00047-4.
24. Semina I.A., Andreeva E.G. Simulation modeling of the maximum current protection of a power transformer in the Matlab Simulink program. *Electrotechnical and information complexes and systems*, 2021, vol. 17, no. 1, pp. 27–32. In Rus. DOI: 10.17122/1999-5458-2021-17-1-27-32.
25. Tatevosyan A.A., Konakbaeva K.S. Software for selecting the capacity of workshop transformer substations. *Young Russia: advanced technologies for industry*, 2013, no. 2, pp. 334–336. In Rus.
26. Kopyrin V.A., Portnyagin A.L., Khamitov R.N. Ways to improve the efficiency of electric submersible pump units for oil production. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 155–162. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2019/11/2361.
27. Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Glazyrin A.S., Kladiev S.N., Rakov I.V., Portnyagin A.L., Markova A.A. Evaluation of total cost of possessing the electric centrifugal pump with submersible compensator. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 166–175. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/02/3053.

Received: 15 May 2023.  
Reviewed: 25 May 2023.

#### Information about the authors

**Alexander S. Glazyrin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; professor, Yuga State University.

**Yusup N. Isaev**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Vladimir A. Kopyrin**, Cand. Sc., associate professor, Industrial University of Tyumen.

**Vadim V. Timoshkin**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Sergey N. Kladiev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Rustam N. Khamitov**, Dr. Sc., professor, Industrial University of Tyumen; professor, Omsk State Technical University.

**Vladimir Z. Kovalev**, Dr. Sc., professor, Yuga State University; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Fedor A. Losev**, Cand. Sc., associate professor, Industrial University of Tyumen.

**Andrey P. Leonov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

**Evgeny I. Popov**, assistant, Industrial University of Tyumen.

УДК 622.24

## УСТРОЙСТВО И ТЕХНОЛОГИЯ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОМЫВКИ СКВАЖИНЫ

Третьяк Александр Яковлевич<sup>1</sup>,  
13050465@mail.ru

Литкевич Юрий Федорович<sup>1</sup>,  
littk@mail.ru

Круглова Татьяна Николаевна<sup>1</sup>,  
tatyana.kruglova.02@mail.ru

<sup>1</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,  
Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

**Актуальность** исследования обусловлена тем, что в настоящее время большое число аварий происходит по причине остановки вращения буровой колонны и прекращения промывки во время наращивания буровой колонны. Нахождение ствола скважины некоторое время в состоянии покоя, а потом создание импульсов давления промывочной жидкости, сопровождающих пуск и остановку буровых насосов, может привести к нежелательным явлениям и осложнениям в виде прихватов. Прихваты могут быть механические, за счет сложной геометрии ствола скважины, вывалов в породы со стенок скважины, образования шлама на забое скважины за счет недостаточной промывки скважины. Процент таких аварий может достигать 20. До 80 % дифференциальных прихватов обусловлены разностью давлений – гидростатического, образующегося в стволе скважины за счет плотности бурового раствора, и пластового, образующегося в пласте скважины. За счет этих процессов происходит инфильтрация из бурового раствора воды в пласт, а на стенках скважины образуется толстая полимерглинистая корка, которая способствует образованию дифференциальных прихватов, то есть прилипанию буровой колонны к стенкам скважины.

**Цель:** разработать устройство и технологию непрерывной промывки скважин при наращивании бурового инструмента.

**Объекты:** устройство и технология непрерывной промывки скважины.

**Методы.** Предложено для изготовления устройство непрерывной промывки скважины, состоящее из синхронно переключающихся двухпозиционных кранов, обеспечивающих непрерывную промывку скважины при наращивании бурового инструмента. Описан передвижной синхронизатор переключения кранов, приведена его конструкция и принцип действия. Предложены технологические методы, реализующие возможность работы устройства.

**Результаты.** Решение поставленной задачи позволило разработать конструкцию устройства и технологию непрерывной промывки скважин.

### Ключевые слова:

Устройство, непрерывная промывка скважин, технология работы устройства непрерывной промывки, переводник непрерывной промывки, синхронизатор, звездочки, роliko-пластинчатая цепь, байпасная линия промывки, поворотный квадрат, продольный и боковой каналы промывки, корпус крана, рычаг переключения кранов, зубчатое колесо, зубчатая рейка, гидро (пнеumo) цилиндр.

### Введение

Одним из самых критических моментов во всей технологии сооружения скважин на нефть и газ является остановка промывки скважины перед наращиванием и последующий запуск циркуляции бурового раствора. Нахождение ствола скважины некоторое время в состоянии покоя, а потом создание импульсов давления промывочной жидкости, сопровождающих пуск и остановку буровых насосов, может привести к нежелательным явлениям и осложнениям в виде прихватов. Прихваты разделяют на обусловленные механическим взаимодействием и дифференциальные. При этом механические прихваты разделяются на прихваты шламом или обвалившейся породой и заклинивание на участках со сложной геометрией ствола скважины. Доля механических прихватов составляет 20 %, а 80 % приходится на дифференциальные прихваты.

Основной причиной дифференциальных прихватов является наличие фильтрационной корки на стенке скважины, а также разность давлений – гидростатического, образующегося за счет бурового раствора, и пластового. Сообразно с вышеизложенным методы

борьбы с дифференциальными прихватами будут зависеть от оптимально подобранного бурового раствора и возможности снизить разность давлений – гидростатического, сформированного в стволе скважины, и давления непосредственно в нефтегазовом пласте. Изменить пластовое давление не представляется возможным, следовательно, основным элементом борьбы с дифференциальными прихватами является регулирование качества бурового раствора путем изменения параметров.

В случае прекращения вращения буровой колонны происходит вдавливание ее в фильтрационную глинистую корку, образовавшуюся на стенках ствола скважины. При этом резко возрастает трение между буровой колонной и породой ствола скважины, а выполнить вращение или перемещение колонны становится невозможным, и как результат происходит дифференциальный прихват.

Репрессия больше других факторов влияет на силу, прижимающую колонну к стенке скважины с фильтрационной коркой. Эта сила равна произведению дифференциального давления на площадь поверхности контакта:

$$F_{\text{пр}} = P_{\text{диф}} \cdot S, \quad (1)$$

где  $F_{\text{пр}}$  – прижимающая сила Н;  $P_{\text{диф}}$  – дифференциальное давление, Па;  $S$  – площадь поверхности контакта, м<sup>2</sup>.

Раскрывая природу прижимающей силы (1), усилие дифференциального прихвата можно определить как:

$$F_{\text{пр}} = (P_1 - P_2) \cdot S \cdot K,$$

где  $P_1, P_2$  – разница давлений между забойным (гидростатическим) давлением в проницаемом коллекторе и давлением, создаваемым за счет плотности бурового раствора;  $K$  – коэффициент трения, равен 0,1–0,2 для раствора на углеводородной основе.

#### Методы и материалы

Работы по разработке устройства и технологии непрерывной промывки скважины не прекращаются в течение уже более ста лет. Вместе с тем в настоящее время уже имеются практические результаты по разработке устройства для непрерывной промывки скважин при выполнении спускоподъемных операций. Это прежде всего патенты по этой проблеме [1–12].

При бурении скважин в неустойчивых породах наиболее опасным для состояния ствола скважины является остановка и возобновление циркуляции, когда импульсы давления бурового раствора могут вызвать обвалы пород и механические прихваты буровой колонны.

Целью данной статьи является постановка технических задач для разработки устройства для непрерывной промывки скважин при наращивании бурового става.

Известно конкретное применение таких устройств, например, компания Vasco International представляет собой полностью компьютеризированную систему в виде сборки из трех превенторов, устанавливаемых на роторе. Это сложное и дорогостоящее устройство. Известна Система непрерывной промывки (СНП) «Курс», предназначенная для использования на буровых установках с верхним приводом [5, 6, 9].

Непрерывная промывка скважин, предполагающая циркуляцию бурового раствора не только в процессе бурения скважины, но и при наращивании и подъеме буровой колонны, является в настоящее время весьма востребованным технологическим режимом. Особенно она эффективна при наличии или риске осложнений в стволе скважины, при бурении длинных горизонтальных стволов и наклонных скважин с большим отходом от вертикали, при бурении с контролем давления, бурении на депрессии и в других случаях.

Для организации непрерывной промывки скважины используется встроенный в колонну буровых труб специальный переводник для непрерывной промывки (ПНП), в котором размещается клапан (или несколько клапанов), перенаправляющий и перераспределяющий поток промывочной жидкости, а в боковой стенке этого переводника имеется отверстие, через которое эпизодически производится промывка скважины. Чтобы обеспечить непрерывную циркуля-

цию, модифицируется также гидравлическая система промывки скважины – кроме обычной (основной) линии промывки скважины, когда буровой раствор поступает в скважину через вертлюг на верхнем конце буровой колонны (через верхнюю трубу), создается байпасная линия промывки, которая обеспечивает промывку скважины через отверстие в боковой стенке ПНП.

Использование для промывки скважины основной или байпасной линии согласуется с работой клапана в ПНП – во время бурения клапан перекрывает отверстие в стенке ПНП и открывает отверстие для промывки скважины через верхнюю трубу буровой колонны, а при наращивании (или подъеме) открывает отверстие в стенке ПНП и перекрывает промывку через верхнюю трубу буровой колонны. При этом промывка скважины производится через байпасную линию, а верхнюю трубу в это время можно удалить (или, наоборот, вставить) из колонны буровых труб.

Один из важнейших узлов в системе непрерывной промывки является узел стыковки байпасной линии промывки с ПНП – боковой порт непрерывной промывки (БПНП). Основное требование к этому узлу – обеспечить герметичность и механическую надежность стыковки грязевого шланга байпасной линии промывки с отверстием в стенке ПНП.

Известен ПНП, разработанный компанией Managed Pressure Operations International Ltd (MPO) для их системы непрерывной циркуляции Non-Stop Driller Continuous Circulation System. Как следует из этого описания, грязевой шланг, оборудованный специальным разъемом на конце, стыкуется с ответной частью разъема, закрепленного в отверстии в стенке ПНП. При промывке через этот боковой порт из-за колебаний и вибраций грязевого шланга на этот разъем будет действовать момент сил, стремящийся «выломать» его крепление из отверстия в стенке ПНП. Сила воздействия значительно возрастает при смещениях и поворотах буровой колонны, которые часто возникают при наращивании или отвороте верхней трубы. Таким образом, момент сил, возникающих на креплении разъема в отверстии ПНП, расшатывает это крепление и со временем может привести к образованию зазоров и потере герметичности, а при больших амплитудах взаимного смещения грязевого шланга байпасной линии промывки относительно ПНП может привести к его слою. Если ПНП достаточно толстостенный, то силы, расшатывающие крепление, могут быть ниже критических, а конструкция ПНП в целом достаточно надежной [13–20].

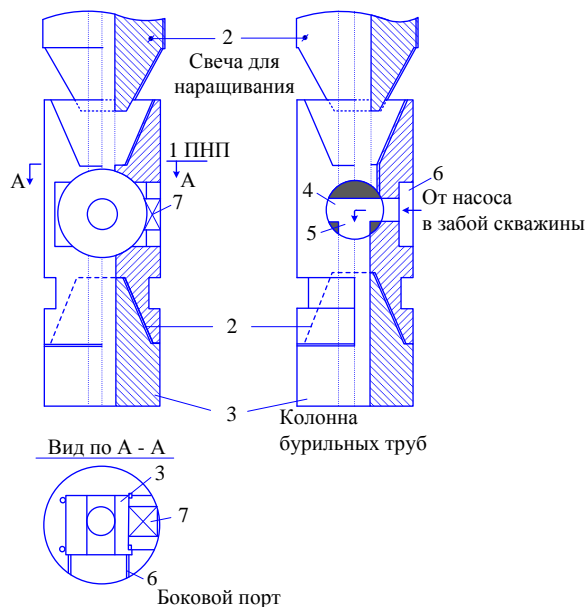
Рассматривая возможность применения устройства и технологии колтюбингового бурения, необходимо отметить, что в настоящее время нет пока разработанных технических решений, но в будущем они, очевидно, появятся.

#### Результаты и обсуждения

В Южно-Российском государственном политехническом университете (НПИ) имени М.И. Платова разработано устройство и технология непрерывной промывки скважин.



На рис. 1 представлено разработанное нами альтернативное устройство, включающее проводник непрерывной промывки, устанавливаемый на каждой свече и передвижной синхронизатор переключения двухходовых кранов, показанный на рис. 2.

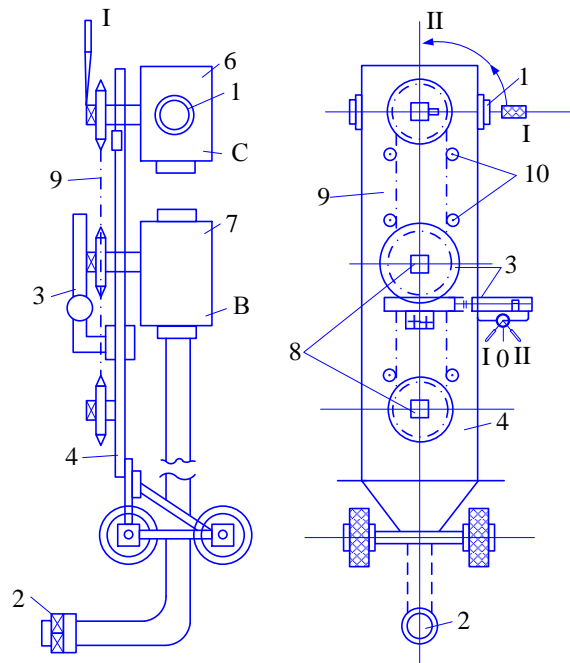


**Рис. 1.** Переводник непрерывной промывки при наращивании буровой колонны: 1 – корпус; 2 – верхняя и нижняя замковая резьба; 3 – крановый цилиндр, имеющий сквозной осевой – 4 и перпендикулярно к нему боковой – 5 канал; 6 – боковой порт; 7 – поворотный квадрат переходника непрерывной промывки (ПНП)

**Fig. 1.** Continuous flush sub for drill string extension: 1 – body; 2 – upper and lower locking thread; 3 – crane cylinder having a through axial – 4 and perpendicular to it lateral – 5 channel; 6 – side port; 7 – rotary square continuous flush adapter (PNP)

Синхронизатор состоит из панели – 4 на тележке с закрепленными на ней крановыми корпусами – 6, 7 с присоединенными к ним основной – 1 и байпасной – 2 линиями промывки (подачи бурового раствора в скважину). На приводных хвостовиках – 7 крановых цилиндров и на поворотном квадрате – 8 закреплены звездочки одинакового диаметра, объединенные замкнутой пластинчатой цепью – 9. При повороте рукоятки – I на 90° все звездочки поворачивают краны А, В и С синхронно на 90°, обеспечивая при этом прямую или боковую подачу бурового раствора в скважину.

ПНП (рис. 1) состоит из корпуса – 1; верхней и нижней замковой резьбы – 2 и кранового цилиндра – 3, имеющего сквозной осевой – 4 и перпендикулярно к нему расположен боковой канал – 6. В положении крана (II) (рис. 3) сквозной осевой канал – 4 соединяется с боковым портом – 6, через который ведется промывка скважин от байпасной линии, присоединенной к боковому порту (кран переводника непрерывной промывки может использоваться в двух положениях).



**Рис. 2.** Передвижной синхронизатор переключения (ПСПК) кранов (А, В, С): 1 – порт присоединения основной линии промывки; 2 – байпасная линия промывки; 3 – зубчато-реечный переключатель кранов; 4 – рычаг ручного переключения кранов (запасной); 5 – панель; 6 – корпус крана С; 7 – корпус крана В; 8 – поворотные квадраты кранов; 9 – приводная цепь; 10 – натяжные ролики цепи

**Fig. 2.** Mobile switching synchronizer (PSPK) of valves (A, B, C): 1 – connection port of the main flushing line; 2 – bypass washing line; 3 – gear-rack switch of cranes; 4 – lever for manual switching of cranes (spare); 5 – panel; 6 – valve body C; 7 – valve body B; 8 – rotary squares of cranes; 9 – drive chain; 10 – chain tension rollers

Положение I (рис. 3, А) соответствует бурению, когда осевой кран – 4 располагается вдоль бурильной колонны, и буровой раствор проходит на забой, охлаждает долото и обеспечивает помывку скважины.

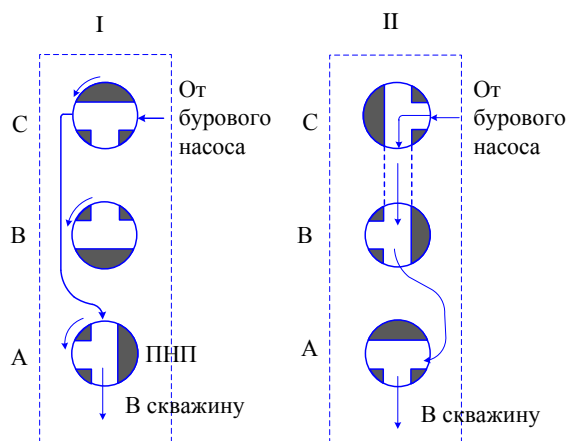
Положение II (рис. 3, А) соответствует наращиванию бурового става. При этом поток бурового раствора на байпасной линии через боковой порт – 6 по осевому каналу – 4 и боковому каналу – 5 проходит в скважину, на забой и обеспечивает его промывку.

В это время производят наращивание или отсоединение верхней свечи от бурильной колонны или ведущей трубы.

При наращивании бурильной колонны выполняются следующие операции.

Приподнимают бурильную колонну до полного выхода ведущей трубы из ротора и осуществляют посадку бурильной колонны на клинья (или на спайдер).

Подводят передвижной синхронизатор переключения кранов (ПСПК) к ротору и соединяют поворотный квадрат синхронизатора с квадратом кранового цилиндра, ПНП и байпасную линию промывки соединяют с боковым портом ПНП.



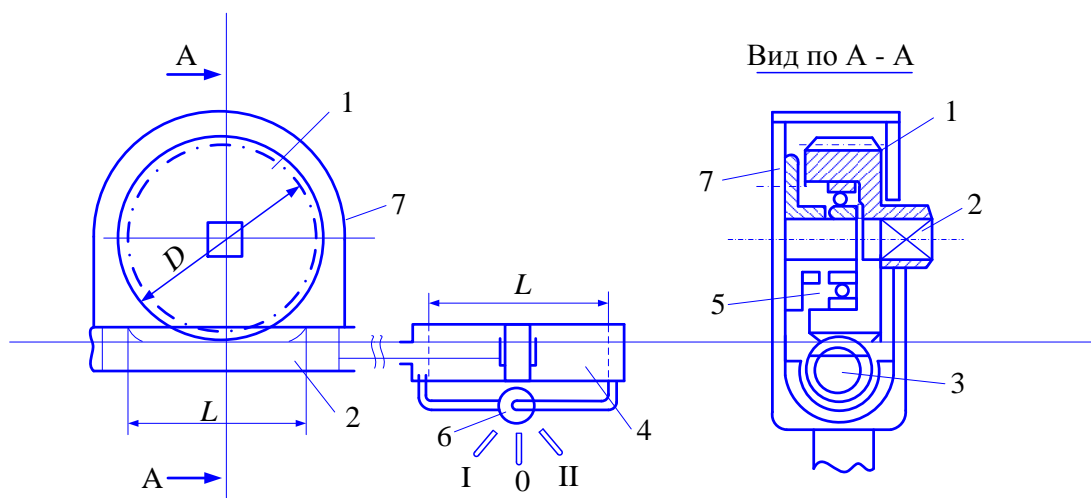
**Рис. 3.** Положение крановых каналов при: I – прямая подача бурового раствора в скважину (исходное положение); II – боковая подача бурового раствора в скважину (при синхронном повороте кранов ABC на 90°); ПНП – переводник непрерывной промывки

**Fig. 3.** Position of the valve channels at: I – direct supply of drilling fluid into the well (initial position); II – lateral supply of drilling fluid into the well (with synchronous rotation of the ABC valves by 90°); PNP – continuous flush sub

Перевод синхронизатора из положения I в положение II осуществляется зубчато-реечным переключателем кранов (ЗРПК) (рис. 4). ЗРПК состоит из зуб-

чатого колеса – 1 с поворотным квадратом – 2, зубчатой рейки – 3, соединенной со штоком гидро- или пневмоцилиндра – 4. Управление движением поршня гидро- или пневмоцилиндра производится гидрораспределителем двухпозиционным – 6. При перемещении поршня из крайнего левого положения в крайнее правое происходит поворот зубчатого колеса на 90°. При этом все краны синхронизатора (A, B и C) из положения II (рис. 2) займут положение I, и буровой раствор по осевому каналу прямой подачи будет проходить в скважину.

Затем ведущую трубу отсоединяют от буровой колонны и спускают в шурф. Далее берут очередную подготовленную трубу и производят свинчивание с буровой колонной. После этого поднимают ведущую трубу с вертлюгом из шурфа и соединяют с буровой колонной. Ручку управления синхронизатора ПСПК переводят из положения II в положение I (рис. 2). При этом все краны (A, B и C) займут положение I, показанное на рис. 2, и буровой раствор по осевому каналу прямой подачи будет проходить в скважину. Отсоединяют байпасную линию от бокового порта, ставят заглушку (на рис. 1), отсоединяют поворотный квадрат синхронизатора от квадрата кранового цилиндра и отводят ПСПК от ротора (рис. 3). Нарощенную буровую колонну снимают с клиньев ПКР и спускают в скважину, доводят долото до забоя, и продолжают бурение.



**Рис. 4.** Зубчато-реечный переключатель кранов: 1 – зубчатое колесо ( $m=8$ ,  $z=38$ ), 2 – поворотный квадрат; 3 – зубчатая рейка ( $m=8$ ,  $z=10$ ); 4 – гидроцилиндр ( $L=250$  мм); 5 – шариковый подшипник; 6 – гидрораспределитель двухпозиционный; 7 – кожух

**Fig. 4.** Rack and pinion switch of cranes: 1 – gear wheel ( $m=8$ ,  $z=38$ ), 2 – rotary square; 3 – gear rack ( $m=8$ ,  $z=10$ ); 4 – hydraulic cylinder ( $L = 250$  mm); 5 – ball bearing; 6 – hydraulic two-position distributor; 7 – casing

На рис. 5 представлен общий вид буровой установки и конфигурация системы непрерывной промывки при бурении и прямой подаче бурового раствора в скважину. Кран С открыт для свободного прохода бурового раствора от насоса через вертлюг, приводной квадрат и через открытый кран А в буровую колонну и далее на забой скважины. Кран В закрыт, он отсекает буровой раствор от прохода в байпасную линию.

На рис. 6 показан общий вид буровой установки и конфигурация системы непрерывной промывки при наращивании буровой колонны. Перед наращиванием, после присоединения синхронизатора ПСПК к переводнику ПНП, ручку синхронизатора переводят поворотом на 90° из положения I в положение II. При этом кран С перекрывает проход буровому раствору к вертлюгу, перенаправляя его через кран В в байпасную линию. Одновременно с краном С кран А пере-

крывает проход буровому раствору из ведущей трубы в скважину и открывает свободный проход буровому раствору из байпасной трубы в скважину.

I – Положение кранов А, В и С при прямой подаче бурового раствора в скважину



Рис. 5. Общий вид буровой установки при бурении и прямой подаче бурового раствора в скважину

Fig. 5. General view of the drilling rig during drilling and direct supply of drilling fluid into the well

II – Положение кранов А, В и С при боковой подаче бурового раствора в скважину



Рис. 6. Общий вид и конфигурация системы непрерывной промывки при наращивании бурового става

Fig. 6. General view and configuration of the continuous washing system during drilling rate build-up

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ропяной А.Ю., Скобло В.З. Ориентирование бурового инструмента и контроль траектории бурения при забурировании боковых стволов из обсадных колонн вертикальных скважин // Бурение и нефть. – 2018. – № 5. – С. 47–51.
2. Янгазитов М.Н., Доценко Б.А., Оганов А.С. Бурение скважин при равновесном давлении с системой «непрерывной» циркуляции бурового раствора // Вестник ассоциации буровых подрядчиков. – 2011. – № 2. – С. 17–22.

Для кранов крутящий момент сопротивления закрытия-открытия ( $M_{к.з}$ ) находится в пределах  $M_{к.з.}=25-35$  (Н м), тогда общее сопротивление трех кранов

$$\sum_1^3 M_{к.з} = 3(M_{к.з} \cdot k),$$

где  $k = 1,5$  – коэффициент запаса, превышающий паспортное значение сопротивления закрытия.

Для преодоления сопротивления закрытию трех кранов на зубчатом колесе – 1 диаметр определяется по формуле (м):

$$D_{з.к} = m(z + 2),$$

где  $m$  – модуль зуба;  $z$  – количество зубьев.

Чтобы сформировать крутящий момент  $M_k$ , превышающий  $\sum_1^3 M_{к.з}$ , т. е.  $M_k \gg \sum_1^3 M_{к.з}$ , необходимо создать усилие (Н), развиваемое гидро(пнеumo) цилиндром ( $P_n$ ), которое определяется по формуле:

$$P_n \geq \frac{\sum_1^3 M_{к.з} \cdot 2}{D_{з.к}} = \frac{3(M_{к.з} \cdot k) \cdot 2}{m(z + 2)}.$$

#### Выводы

1. Предложена система непрерывной промывки скважины, которая включает в себя оборудование для непрерывной промывки скважины при бурении и спускоподъемных операциях.
2. Конструктивно разработано устройство, позволяющее осуществлять непрерывную промывку и исключить возникновение прихватов буровой колонны во время остановки буровой колонны в процессе проведения спускоподъемных операций.
3. Непрерывная прямая или боковая подача бурового раствора в скважину при наращивании, бурении или спускоподъемных операциях при роторном бурении имеет следующие преимущества:
  - исключаются затраты времени на промывку скважины перед и после наращивания буровой колонны;
  - снижается вероятность формирования шламовых подушек в горизонтальной части ствола и вероятность прихвата буровой колонны;
  - увеличивается скорость проходки и повышается точность навигации;
  - повышается эффективность и снижается стоимость бурения скважин.
4. Отсутствие серьезных научно-технических проблем, связанных с разработкой отдельных узлов системы непрерывной промывки, свидетельствует о реальной перспективе ее создания.

3. Шаровой кран бокового порта непрерывной промывки скважин: пат. РФ № 2612409; заявл. 09.09.15, опубл. 09.03.17, Бюл. № 7. – 14 с.
4. Боковой порт непрерывной промывки: пат. РФ № 2612402, заявл. 02.06.15, опубл. 09.03.17, Бюл. № 36. – 12 с.
5. Ропяной А.Ю., Скобло В.З., Стражгородский С.И. Система непрерывной промывки скважины при бурении, СПО и спуске хвостовиков на буровых трубах – СНП «КУРС» // Бурение и нефть. – 2015. – № 9. – С. 58–61.

6. Ропяной А.Ю., Скобло В.З., Стражгородский С.И. Система непрерывной промывки скважин – СНП «курс» // Вестник ассоциации буровых подрядчиков. – 2015. – № 3. – С. 15–19.
7. Вертлюг непрерывной промывки: пат. РФ № 2562623, заявл. 06.06.14, опубл. 10.09.15, Бюл. № 25. – 16 с.
8. Скобло В.З., Ропяной А.Ю., Лухт А.И. Универсальный измерительный забойный блок mwd-систем // Вестник ассоциации буровых подрядчиков. – 2012. – № 4. – С. 46–48.
9. Скобло В.З., Ропяной А.Ю., Лухт А.И. «Гироориентатор-курс» – прибор для гироскопического ориентирования отклонителя в процессе бурения // Вестник ассоциации буровых подрядчиков. – 2010. – № 3. – С. 31–34.
10. Викторов М.В. Увеличение эффективности очистки призабойной зоны пласта с применением устройства промывочного скользящего // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2021. – Т. 2. – С. 200–204.
11. Лухт А.И., Ропяной А.Ю., Скобло В.З. Гироскопический сбросовый многоточечный инклинометр «gyromultishot» // Вестник ассоциации буровых подрядчиков. – 2006. – № 4. – С. 10–12.
12. Боковой порт непрерывной промывки: заявка на изобретение РФ № 2015120720. 02.06.15, опубл. 27.12.16, Бюл. № 36. – 1 с.
13. Apparatus for uninterrupted flushing a well bore. Patent USA no. US 8.201.804 B2, date of Patent: Jun. 19, 2012.
14. Deryaev A.R. Features of drilling technology for dual completion, joint operation of several horizons in a multi-layer field // Cognition Rerum. – 2022. – № 5. – С. 12–21.
15. Plasma-pulse exposure technology on the wells of the sherubaynurinsky / L. Mullagaliyeva, S. Baimukhametov, V. Portnov, V. Yurov // Annali d'Italia. – 2022. – № 27. – P. 75–79.
16. Nurgaliev A.R., Filippov V.N., Loginova M.E. Application of information technologies at the design stage of oil and gas wells. Information Technology // Problems and Solutions. – 2020. – № 1 (10). – С. 21–26.
17. SolidWorks Flow Simulation 2012 Tutorial // Docslide. 2014. URL: <https://docslide.us/documents/solidworks-flow-simulation-2012-tutorial.html> (дата обращения 11.06.2019).
18. SolidWorks, «SOLIDWORKS Flow Simulation» // Dassault Systemes Company. 2012–2019. URL: <https://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm> (дата обращения 11.06.2019).
19. Cengel Y.A., Cimbala J.M. Fluid mechanics. Fundamentals and applications. Third edition. – New York: McGraw Hill Publ., 2014. – 968 p.
20. Differential-sticking mechanisms and a simple wellsite test for monitoring and optimizing drilling mud properties / P.I. Reid, G.H. Meeten, P. Clark, B.D. Chambers, A. Gilmour, M.W. Sanders // SPE Drilling & Completion. – June 2000. – V. 15. – № 15 (2). – P. 97–104. DOI: 10.2118/64114-PA

Поступила: 25.03.2023 г.

Прошла рецензирование: 30.03.2023 г.

#### Информация об авторах

**Третьяк А.Я.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой нефтегазовых техники и технологий Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

**Литкевич Ю.Ф.**, кандидат технических наук, доцент Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

**Круглова Т.Н.**, кандидат технических наук, доцент Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова.

UDC 622.24

## DEVICE AND TECHNOLOGY OF CONTINUOUS WELL FLUSHING

Alexander Ya. Tretyak<sup>1</sup>,  
13050465@mail.ru

Yuri F. Litkevich<sup>1</sup>,  
litk@mail.ru

Tatiana N. Kruglova<sup>1</sup>,  
tatyana.kruglova.02@mail.ru

<sup>1</sup> M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI),  
132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the fact that at present a large number of accidents occur due to the stoppage of the rotation of the drill string and the cessation of flushing during the build-up of the drill string. Staying the wellbore for some time at rest, and then creating flushing fluid pressure pulses accompanying the start and stop of mud pumps, can lead to undesirable phenomena and complications in the form of sticking. Sticking can be mechanical, due to the complex geometry of the wellbore, falls into the rocks from the walls of the well, the formation of cuttings at the bottom of the well due to insufficient flushing of the well. The percentage of such accidents can reach 20. Up to 80 % of differential sticking is due to the pressure difference – hydrostatic, formed in the wellbore due to the density of the drilling fluid, and reservoir, formed in the well formation. Due to these processes, water infiltration from the drilling fluid into the formation occurs, and a thick polymer clay cake is formed on the well walls, which contributes to the formation of differential sticking, that is, the sticking of the drill string to the well walls.

**Purpose:** to develop a device and technology for continuous flushing of wells when building a drilling tool.

**Objects:** device and technology for continuous well flushing.

**Methods.** A device for continuous flushing of the well, consisting of synchronously overlapping on-off valves that provide continuous flushing of the well when building up the drilling tool is proposed for manufacturing. A mobile crane switching synchronizer is described, its design and principle of operation are given. Technological methods are proposed that realize the possibility of the device operation.

**Results.** The solution of the task set made it possible to develop the design of the device and the technology of continuous flushing of wells.

### Key words:

Device, continuous flushing of wells, technology of operation of the continuous flushing device, continuous flushing translator, synchronizer, sprockets, roller-plate chain, bypass flushing line, rotary square, longitudinal and lateral flushing channels, crane body, crane shift lever, gear wheel, gear rack, hydro (pneumatic) cylinder.

### REFERENCES

- Ropyanoy A.Yu., Skoblo V.Z. Orientation of the drilling tool and control of the drilling trajectory when drilling side shafts from the casing columns of vertical wells. *Drilling and oil*, 2018, no. 5, pp. 47–51. In Rus.
- Yangazitov M.N., Dotsenko B.A., Oganov A.S. Drilling wells at equilibrium pressure with a system of «continuous» circulation of drilling fluid. *Bulletin of the Association of Drilling Contractors*, 2011, no. 2, pp. 17–22. In Rus.
- Ropyanoy A.Yu., Skoblo V.Z. *Sharovoy kran bokovogo porta nepreryvnoy promyvki skvazhin* [Ball valve of the side port of well continuous flushing]. Patent RF, no. 2612409, 2017.
- Ropyanoy A.Yu., Skoblo V.Z. *Bokovoy port nepreryvnoy promyvki* [Side port of continuous flushing]. Patent RF no. 2612402, 2017.
- Ropyanoy A.Yu., Skoblo V.Z., Strazhgorodsky S.I. The system of continuous flushing of the well during drilling, SPO and lowering of shanks on drill pipes – SNP «course». *Drilling and oil*, 2015, no. 9, pp. 58–61. In Rus.
- Ropyanoy A.Yu., Skoblo V.Z., Strazhgorodsky S.I. System of continuous flushing of skv-zhin – SNP «course». *Bulletin of the Association of drilling contractors*, 2015, no. 3, pp. 15–19. In Rus.
- Ropyanoy A.Yu., Skoblo V.Z. *Vertlug nepreryvnoy promyvki* [Continuous washing swivel]. Patent RF no. 2562623, 2015.
- Skoblo V.Z., Ropyanoy A.Yu., Lukht A.I. Universal measuring downhole block of mwd-systems. *Bulletin of the Association of Drilling Contractors*, 2012, no. 4, pp. 46–48. In Rus.
- Skoblo V.Z., Ropyanoy A.Yu., Lukht A.I. «Gyroorientator-course» – a device for gyroscopic orientation of the deflector during drilling. *Bulletin of the Association of Drilling Contractors*, 2010, no. 3, pp. 31–34. In Rus.
- Viktorov M.V. Increasing the efficiency of cleaning the bottom-hole zone of the formation using a sliding flushing device. *Problems of development of hydrocarbon and ore mineral deposits*, 2021, vol. 2, pp. 200–204. In Rus.
- Lukht A.I., Ropyanoy A.Yu., Skoblo V.Z. Gyroscopic discharge multipoint in-clinometer «gyromultishot». *Bulletin of the Association of Drilling Contractors*, 2006, no. 4, pp. 10–12. In Rus.
- Ropyanoy A.Y., Skoblo V.Z. *Bokovoy port nepreryvnoy promyvki* [Side port continuous flushing]. Patent RF no. 2015120720, 2015.
- Strazhgorodskiy S.I. *Apparatus for uninterrupted flushing a well bore*. Patent USA no. US 8.201.804 B2, 2012.
- Deryaev A.R. Features of drilling technology for dual completion, joint operation of several horizons in a multi-layer field. *Cognitio Rerum*, 2022, no. 5, pp. 12–21.
- Mullagaliyeva L., Baimukhametov S., Portnov V., Yurov V. Plasma-pulse exposure technology on the wells of the sherubaynurinsky. *Annali d'Italia*, 2022, no. 27, pp. 75–79.
- Nurgaliev A.R., Filippov V.N., Loginova M.E. Application of information technologies at the design stage of oil and gas wells. *Information Technology. Problems and Solutions*, 2020, no. 1 (10), pp. 21–26.
- SolidWorks Flow Simulation 2012 Tutorial. *Docslide*. 2014. Available at: <https://docslide.us/documents/solidworks-flow-simulation-2012-tutorial.html> (accessed 11 June 2019).
- SolidWorks, «SOLIDWORKS Flow Simulation». *Dassault Systemes Company*. 2012–2019. Available at: <https://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm> (accessed 11 June 2019).
- Cengel Y.A., Cimbala J.M. *Fluid mechanics. Fundamentals and applications*. 3<sup>rd</sup> ed. New York, McGraw Hill Publ., 2014. 968 p.
- Reid P.L., Meeten G.H., Clark P., Chambers B.D., Gilmour A., Sanders M.W. Differential-sticking mechanisms and a simple wellsite test for monitoring and optimizing drilling mud properties. *SPE Drilling & Completion*, 2000, vol. 15, no. 15 (2), pp. 97–104. DOI: 10.2118/64114-PA

Received: 25 March 2023.

Reviewed: 30 March 2023.

**Information about the authors**

**Alexander Ya. Tretyak**, Dr. Sc., professor, head of the Oil and Gas Engineering and Technology Department, M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI).

**Yuri F. Litkevich**, Cand. Sc., associate professor, M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI).

**Tatiana N. Kruglova**, Cand. Sc., associate professor, M.I. Platov South Russian State Polytechnic University (NPI).



УДК 556.551:577.53:550.424.6:550.461:546.79

## МИГРАЦИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В СИСТЕМЕ «ГИДРОКРИОГЕННЫЕ КОМПОНЕНТЫ – ВОДА – ПОРОВЫЕ ВОДЫ ДОННЫХ ОСАДКОВ» В ГОРОДСКИХ ВОДОЕМАХ

Селезнев Андриан Анатольевич<sup>1,2</sup>,  
sandrian@rambler.ru

Торопов Андрей Сергеевич<sup>3</sup>,  
torop990@gmail.com

Окунева Татьяна Геннадьевна<sup>4</sup>,  
okunevatatjana@mail.ru

Киселева Дарья Владимировна<sup>4,2</sup>,  
podarenka@mail.ru

Ярмошенко Илья Владимирович<sup>1</sup>,  
ivy@ecko.uran.ru

Рянская Анастасия Дмитриевна<sup>4</sup>,  
tosenska2008@gmail.com

<sup>1</sup> Институт промышленной экологии УрО РАН,  
Россия, 620990, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 20.

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет,  
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Россия, 119234, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1.

<sup>4</sup> Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН,  
Россия, 620110, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью получения информации о поведении природных радионуклидов в условиях урбанизированного ландшафта при современном осадконакоплении. В частности, нет полных данных о влиянии физико-химических свойств компонентов городской среды на процессы миграции радионуклидов в системе «водосбор – бессточный водоем», о процессах накопления природных радионуклидов при стоке наносов с водосбора урбанизированной среды в донных отложениях в долгосрочный период времени, о формах нахождения и геохимических особенностях поведения природных радионуклидов в системе «гидрокриогенные компоненты – вода водоемов – поровые растворы донных осадков».

**Цель:** выявить закономерности миграции естественных радионуклидов в системе «водосбор–водоем» на урбанизированной территории при формировании стока наносов.

**Объекты:** водоемы и их водосборы на урбанизированной территории, компоненты окружающей среды города (снег, лед, вода, поровая вода, донные осадки, снеготаяющая пульпа), макрокомпонентный состав объектов окружающей среды, содержание урана и тория в них.

**Методы:** ландшафтно-геохимическое опробование, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, рентгеновская порошковая дифрактометрия, титрование, спектрофотометрия, пламенная фотометрия.

**Результаты.** Получены данные о гидрохимических характеристиках выбранных водоемов урбанизированной среды и их водосборов. Воды водоемов обогащены U и Th на порядки выше, чем снеготаяющие массы (жидкая фаза поверхностного стока) и осадки. Определены доминирующие формы миграции природных радионуклидов в изученных компонентах городского акваланда. Формы урана представлены в виде уранилкарбонатных комплексов разного состава, тория – карбонат-гидроксильными комплексами. Выявлены связи между физико-химическими и гидрохимическими показателями компонентов окружающей среды в системе «водосбор–водоем». Определены тенденции и механизмы, которые могут повлиять на формирование геохимической ситуации водоемов, загрязнение вод и донных отложений. Поровые растворы донных отложений содержат уран и торий в более высоких концентрациях, чем в воде водоемов. Такие минералы донных осадков как пирит, монтмориллонит и кальцит наряду с органическим веществом определяют поведение природных радионуклидов и их мобилизацию в донных осадках городских водоемов Екатеринбурга.

### Ключевые слова:

уран, торий, снег, снеготаяющая пульпа, поровые воды, водная миграция, формы нахождения, урбанизированная среда, современный седиментогенез, трассер.

### Введение

Геохимические условия в поверхностных водных объектах, накопление и смыл поллютантов в них напрямую зависят от геохимических условий на водосборе. В водоеме урбанизированной территории гидрогеохимические условия определяются наложением антропогенного воздействия на природные особенности его формирования [1].

Поступление загрязняющих веществ в водные объекты от неточечных, диффузных источников, в дополнение к поступлению от стационарных источников загрязнения: со стоком талых, дождевых и по-

ливомоечных вод, почвенным и подземным стоком, является одной из важных экологических проблем города [2–5]. Главным неточечным источником загрязнения урбанизированной среды является автомобильный транспорт и дорожная сеть [5, 6]. Диффузные источники динамичны, их трудно, а часто невозможно, идентифицировать и учитывать [6].

Различные виды современных наносов на городской территории (дорожная и тротуарная пыль, отложения ливневой канализации, отложения в понижениях микрорельефа и т. д.) также можно отнести к неточечным источникам загрязнения городской сре-

ды. Они аккумулируют поллютанты и транспортируют загрязнение [7–9]. Образование, перенос и накопление наносов обусловлены процессами разрушения покрытий и материалов, эрозией почвы и грунта, нарушением технологий благоустройства и содержания городских территорий, земляными работами [10–13], выпадением пыли из атмосферы, нарушением поверхностного стока дождевых вод [10, 14–19]. Поток терригенного материала в городском ландшафте объединяет сток с непроницаемых (бетон, тротуары, дороги) и проницаемых (почва, газоны, грунты) поверхностей, преобразуя латеральную связанность различных функциональных зон городского микроландшафта в каскадную систему [11, 20, 21]. Из-за особенностей седиментационного каскада накопление наносов в городах выше, чем в условиях естественного водосбора [11]. Существующие подходы к количественной оценке динамики городского осадконакопления и миграции поллютантов основаны на оценке связанности ландшафтных зон в городе [20, 22–24], учитывают влияние автомобильного транспорта [11, 25]. Уличная уборка и мероприятия по благоустройству территорий снижают количество наносов в городской среде [26, 27]. Объем поверхностных осадков городской среды достаточно велик [28]. Вынос терригенного материала с городских территорий влияет на химический состав поверхностных вод и является источником загрязнения в региональном и глобальном масштабе [7, 9].

Современные седиментационные процессы в городской черте происходят и в холодное время года. В регионах с холодной зимой гидрокриогенные компоненты (снег, снеготрясаемая пульпа (СТП), лед) выступают в качестве депонирующих загрязнение природных сред [6, 29–31]. СТП аккумулирует атмосферные выпадения и твердый материал поверхностных наносов [32, 33]. Накопление поллютантов снеготрясаемой пульпой за холодный период года сопоставимо с накоплением в теплый период. При снеготаянии растворенные поллютанты и взвешенные вещества со стоком переносятся в почву и водные объекты города [34, 35]. В результате стока с городских территорий происходят процессы геохимической трансформации водных объектов. Изменения геохимической среды оценивают по изменению гранулометрического состава донных отложений, форм нахождения загрязняющих веществ в компонентах водоемов и их поведения на барьерах, а также по объемам поступления поллютантов с водосбора [34] и их доступности для живых организмов [34, 36, 37].

В качестве трассера миграции вещества в водоемах используются радионуклиды природного и техногенного происхождения [38]. В седиментационном каскаде на городской территории природные радионуклиды показали себя как индикаторы процессов современного осадкообразования [39, 40]. Свойства индикатора, или трассера, загрязнения городской среды такими элементами, как Pb, Zn и Cu, в современных процессах осадконакопления проявил техногенный радиоактивный изотоп – цезий-137 [41]. Вопросы влияния геохимической обстановки на перенос радионуклидов, подходов к термодинамическому моделированию форм нахождения урана в различных

природных объектах, анализа информативности гидрокриогенных компонентов как индикаторов изменений природной среды, а также особенностей миграции радионуклидов в системе «вода–порода» освещались в работах по различным регионам [42–48].

В условиях современного осадконакопления на урбанизированной территории до конца остается не исследованным:

- влияние физико-химических свойств компонентов окружающей среды на перенос природных радионуклидов в системе «водосбор–водоем»;
- накопление природных радионуклидов в донных отложениях водоема при стоке наносов с водосбора в долгосрочный период времени (до нескольких десятков лет);
- формы нахождения и геохимические особенности поведения природных радионуклидов в сопряженных объектах водосбора и водоема: гидрокриогенные компоненты – вода водоемов – вода донных осадков.

Целью работы было выявить закономерности миграции естественных радионуклидов в системе «водосбор–водоем» на урбанизированной территории при формировании стока наносов. Исследование проведено на примере города Екатеринбурга.

#### Материалы и методы

##### Описание района исследования

Екатеринбург является четвертым по численности населения городом России (примерно 1,5 млн человек), административным центром Свердловской области и Уральского федерального округа. Город находится на границе восточных предгорий Среднего Урала и Зауральской складчатой возвышенности в умеренной континентальной климатической зоне. Литогенная основа сформирована в результате общей инверсии Уральской эвгеосинклинали и связанных с ней мощных складчатых и разрывных дислокаций, а также внедрения больших масс магмы в позднепалеозойское время. Интрузии представлены ассоциациями гранитов, габбро, клинопироксенитов, серпентинитов и тальк-карбонатных пород. Рыхлые четвертичные отложения позднеплейстоценово-голоценового возраста сплошным чехлом перекрывают коренные породы и представлены элювием и делювием, глинами и суглинками с выветрелым щебнем подстилающих пород и редким гравием кварца [49]. Рельеф на территории города крупнохолмистый. Для Екатеринбурга характерно умеренно теплое лето и умеренно суровая снежная зима; средняя температура января составляет  $-15,3^{\circ}\text{C}$ , а июля  $+17,4^{\circ}\text{C}$ ; холодный период длится 151 день, с ноября по март. Загрязнение города и антропогенная нагрузка на урбанизированный ландшафт обусловлена большим количеством автомобилей, строительных площадок, работой предприятий энергетики, машиностроения и металлообработки.

##### Описание выбранных водоемов и их окрестностей

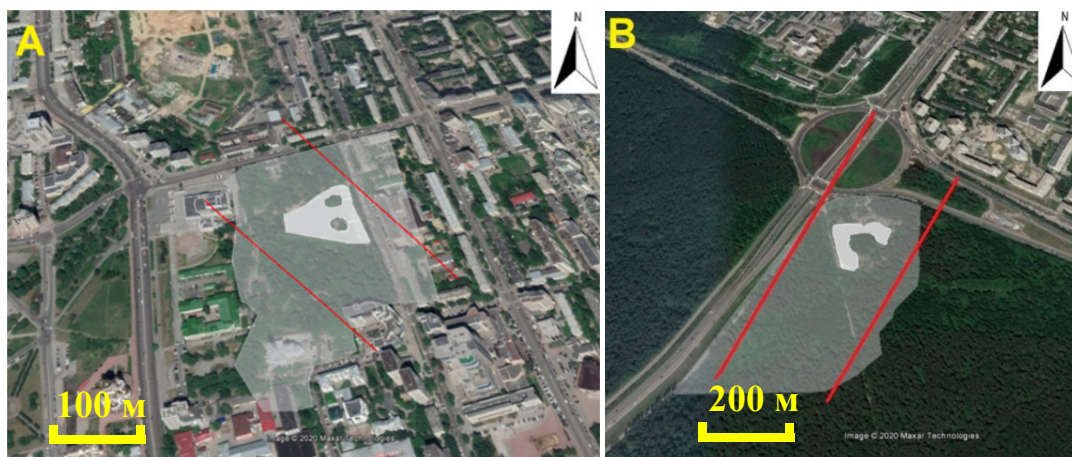
На территории Екатеринбурга для проведения исследования было выбрано два водоема: Чемоданчик и водоем в Харитоновском саду. Водоемы характери-

зуются как бессточные малые мелководные и имеют антропогенное происхождение. Назначение водоемов рекреационное. В оба водоема могут поступать ливневые стоки с прилегающих автодорог и из дренажных канав, питание водоемов осуществляется за счет атмосферных осадков, поверхностных и подземных вод. Площадь зеркала водоема Чемоданчик составляет 7000 м<sup>2</sup>, максимальная глубина 2 м; водоема в Харитоновском саду – 9000 м<sup>2</sup> при максимальной глубине 3,6 м. Водосбор водоема Чемоданчик находится на сопряжении селитебной, рекреационной и зоны транспортной инфраструктуры, представленной объездной автодорогой вокруг города. Водоем Чемоданчик участвует в регулировании сбора поверхностных вод на территории, прилегающей к автодороге; часть берега водоема формируется дамбой. Водосбор водоема в Харитоновском саду расположен на сопряжении селитебной, общественно-деловой, рекреационной зон и улично-дорожной сети, представленной

двухполосными дорогами с относительно высокой интенсивностью движения.

#### Методология исследования

Исследования проводили с помощью подхода трансект-катен [50], адаптированного для целей настоящей работы. В основе подхода лежит бассейновый принцип. Водоем и его водосбор рассматриваются как составные части ландшафта, в котором взаимодействуют гидрохимические и процессы поверхностного латерального сноса вещества. Трансект-катена представляет собой трехмерное тело, в котором сочетаются линейная (профильная) и катенарная (ландшафтно-геохимическая сопряженность) характеристики вместе с площадной формой ландшафта в трансекте (полосе). Водосбор разделен по трансект-катене на латеральные сопряженные фрагменты ландшафта, последовательно сменяющие друг друга в направлении от локального водораздела к локальному базису денудации (водоему).



**Рис. 1.** Схемы трансект-катен водоемов в Харитоновском саду (А) и Чемоданчика (В): матовый контур – площадь водосбора, красные линии – границы трансект-катены; выкопировка из Google Планета Земля

**Fig. 1.** Schemes of catenary complexes of waterbodies in Kharitonovsky garden (A) and Chemodanchik (B): matte contour – the catchment area, red lines – the boundaries of the catenary complex; pictures are copies from Google Earth

На рис. 1 показаны трансект-катены в Харитоновском саду (А) и на водосборе водоема Чемоданчик (В). В водосборах трансект-катен наблюдался достаточный перепад высот, который вызывает линейную и плоскостную эрозию (сбегающие струи по склонам после дождей), приводящую в конечном итоге к заиливанию водоема.

#### Отбор и подготовка проб

В зимне-весенний сезон 2020 г. в выбранных трансект-катенах проводился отбор проб. В водосборе отбирался ненарушенный снежный покров (в парковой зоне) и СГП (на обочинах дорог и тропинках). На поверхности водоема в наиболее глубоких частях выбирались три равноудаленных друг от друга точки. В каждой точке проводилось три параллельных сопряженных отбора проб снега, льда, воды и донных отложений [51].

Проба ненарушенного снежного покрова отбиралась пробоотборным устройством на всю мощность, исключая приземный слой. Проба СГП отбиралась

лопатой (рис. 2, А). Отбор проб льда проводился ручным буром, воды – батометром Молчанова ГР-18 с глубины 1 м (рис. 2, В). Донные отложения отбирались на всю мощность нелитифицированного слоя осадков желонкой стержневого типа с частичным разрушением колонки (рис. 2, С, D). Отбор проб производился с помощью оборудования, обладающего повышенной коррозионной стойкостью, избегая перекрестного загрязнения проб. Пробы отбирались в емкости из полимерных материалов объемом 5 л, емкости для хранения закрывались полимерными крышками.

Колонка донных отложений нарезалась на стратифицированные фрагменты по 4 см, которые упаковывались в полиэтиленовые пакеты с застежкой zip-lock без воздушной пробки. Подготовка проб СГП, снега, льда, воды и донных отложений проводилась согласно ГОСТ Р 51592-2000. Пробы замораживались до температуры –20 °С. Оттаивание проб проводили при комнатной температуре. После оттаивания из проб СГП, снега, льда и воды удалялись крупные



включения, листья, мусор. Пробы фильтровали через фильтры «синяя лента». Для извлечения поровых растворов из донных отложений фрагмент замороженного керна помещался на фильтр «синяя лента» и сразу

после оттаивания при комнатной температуре подвергался вакуумной фильтрации с разрежением 30–100 кПа с помощью лабораторного вакуумного насоса мембранного типа.



**Рис. 2.** Отбор пробы снегогрязевой пульпы на участке объездной автодороги в водосборе водоема Чемоданчик (А), отбор пробы воды из водоема Чемоданчик (В), колонки донных отложений из водоема Чемоданчик (С) и в Харитоновском саду (D) в Екатеринбурге

**Fig. 2.** Sampling of snow-dirt sludge on the roadside of bypass road in the catchment of Chemodanchik reservoir (A), sampling of water from Chemodanchik reservoir (B), columns of bottom sediments from Chemodanchik reservoir (C) and from pond of Kharitonovsky garden (D) in Ekaterinburg

Способ выделения поровых растворов из донных отложений наиболее близок к способу получения поровых вод из работы М. Di Bonito и соавт. [52] с сопоставимым вакуумом и степенью извлечения влаги из образца. Способ практически лишен недостатков метода отжима поровых вод с приложением высоких давлений до тысяч кПа. При этом не происходит процессов разрушения клеточных мембран биоты и выброса внутриклеточной жидкости в общий объем поровых растворов, равно как и сопутствующего выделения физически связанной воды [53]. Полученный поровый раствор можно обозначить как сумму свободной (гравитационной) влаги, капиллярной влаги и диффузионного слоя коллоидных мицелл, связанных с твердым субстратом. Отобранные поровые растворы донных отложений можно характеризовать как флюиды, участвующие в обменных процессах между взвешенной и растворенной фазами донных осадков [54].

В обследованных трансект-катенах были отобраны 30 проб компонентов окружающей среды с водоемов и водосборов:

- 5 проб воды из водоемов;
- 9 проб льда с поверхности водоемов;
- 9 проб снега с поверхности водоемов;
- 4 пробы ненарушенного снега с водосборов;
- 3 пробы СГП с водосборов.

В водоеме Чемоданчик донные отложения развиты мощностью до 50 см, в Харитоновском саду – до 30 см. Мощность отложений увеличивается на участках водоемов с большей глубиной. Всего в водоемах отобрано 13 колонок с донными отложениями. При выделении стратифицированных слоев донных отложений получено 123 пробы. Из 50 образцов выделена поровая вода (15 – из водоема Чемоданчик, 35 – из водоема в Харитоновском саду).

#### Аналитические исследования и обработка данных

В оттаявших пробах СГП, снега, льда, воды и снегогрязевой пульпы с водоемов и водосборов проводилось определение гидрохимических показателей. Измерение pH и Eh проводилось в лаборатории сразу после оттаивания первой достаточной для измерения

аликвоты раствора приборами pH-600 (Milwaukee) и ORP-200 (HM Instrument) соответственно. Определение  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  проводилось методом пламенной фотометрии,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  – методом комплексонометрического титрования,  $\text{Cl}^-$  – титрования,  $\text{CO}_3^{2-}$  и  $\text{HCO}_3^-$  – потенциометрического титрования,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Si – фотометрии. Микроэлементный ИСП-МС, рентгенофазовый и термический анализы проведены в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН, дооснащение которого проведено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение № 075-15-2021-680). Содержание Th и U определялось методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре ELAN 9000 (Perkin Elmer) для донных осадков и масс-спектрометре NexION 300 S (Perkin Elmer) для жидких сред. Пределы обнаружения составляли: 0,05 мкг/кг Th и U для твердых образцов, жидких сред для U – 0,4 нг/л, для Th – 0,01 нг/л. Аналитическая ошибка не превышала 15 %. Минеральный состав донных осадков определялся методом порошковой дифрактометрии на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 фирмы Shimadzu для всех выделенных слоев отобранных колонок. Содержание органического вещества в донных осадках определяли методом термического анализа на дериватографе Diamond TG/DTA. Количественный фазовый состав навесок определялся по результатам анализа дифрактограмм с помощью программного обеспечения SIROQUANT.

Для определения форм нахождения природных радионуклидов в жидких средах проведены термодинамические расчеты с помощью программного комплекса Visual Minteq 3.1. [55–58]. Использовалась встроенная база данных констант равновесия. Были рассчитаны миграционные формы в системе компонентов: pH, Eh, общая щелочность ( $(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ ),  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , Si ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ),  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{UO}_2^{2+}$ ,  $\text{Th}^{4+}$ . Расчеты проведены при температурах, соответствующих измеренным (от 0 до 20 °C) в открытой к атмосферному воздуху системе при давлении 1 атм. Коррекция активности ионов проводилась по уравнению Дэвиса с b-параметром равным 0,3.

При статистической обработке результатов применялись: непараметрический корреляционный анализ Спирмена; кластерный анализ с помощью слияния данных методом полных связей с иерархической кластеризацией через евклидово расстояние, а также факторный анализ с нормализацией матрицы на среднеквадратическое отклонение каждой переменной, ортогональным варимакс-вращением для минимизации числа факторов. Величины факторных нагрузок учтены по модулю. Аномальные точки (больше трех стандартных отклонений) в статистической обработке не учитывались.

### Результаты и обсуждение

Гидрохимическая характеристика исследованных объектов

Воды водоемов характеризуются как пресные и ультрапресные (таблица), значения минерализации варьируются от 130 до 440 мг/л. Сумма растворенных солей для льда водоемов изменялась в диапазоне от

62 до 242 мг/л. В снеготалой воде и жидкой фазе СГП минерализация не превышала 100 мг/л. Аномально высокая минерализация до 4000 мг/дм<sup>3</sup> выявлена у СГП на обьездной автодороге. Для рассматриваемых сопряженных компонентов водоема в системе «снег–лед–вода» наибольшие значения минерализации характерны для воды. Значения минерализации талого льда водоемов занимают промежуточное положение между природными водами и снеготалой водой.

Величины pH природных вод водоемов слабощелочные, снеготалых вод – щелочные. Причиной защелачивания снеготалой воды скорее всего является деятельность строительной отрасли. В Екатеринбурге в последнее десятилетие наблюдаются высокие темпы строительства. Ввиду того, что минерализация снеготалых вод низка, а их буферная емкость незначительна, даже небольшое количество аэрозолей со строительных площадок будет существенно изменять величину водородного показателя. Окислительно-восстановительный потенциал снеготалых вод довольно низкий. Отрицательные аномалии Eh хорошо согласуются с источниками загрязнения атмосферы и фиксируются на локальных участках, приуроченных к промышленным предприятиям и частично к жилой зоне, поскольку кислород является главным потенциалзадающим компонентом талых вод, а его дефицит будет создавать сдвиг линейной зависимости pH–Eh. Похожие закономерности наблюдались в работе В. Макарова [59].

Проба ненарушенного снега, отобранная в водосборе водоема Харитоновского сада в парковой зоне, была принята за локальный фон (далее Фон 1) как наименее измененная по гидрохимическим показателям. Региональным фоном (Фон 2) принята точка экологического мониторинга ФГБУ «Уральское УГМС» (по данным ежегодника загрязнения атмосферного воздуха 2010–2012 гг. из фонда данных ФГБУ «Уральское УГМС»), расположенная в 50 км от города в противоположную сторону от преобладающего направления ветров. Уровень pH фоновых проб снеготалой воды был нейтральным (pH=6,5–6,8).

Результаты гидрохимических исследований водосборов в зимний период представлены в литературе в меньшей степени, чем исследования в теплое время года. В зимний сезон водорастворимые ионы могут коррелировать с загрязнением атмосферы аэрозолями РМ 2,5, органическими и неорганическими поллютантами [60–64]. По литературным данным поступление катионов приурочено в основном к строительной пыли [60], анионов – к стационарным источникам, совместной эмиссии стационарных и движущихся источников [61]. Использование антигололедной смеси приводит к увеличению общей минерализации гидрокриокомпонентов природной среды.

В зимний период дороги, тротуары и проезды на территориях снаружи кварталов и внутридворовых территориях, тропинки в парках посыпаются антигололедным материалом. В Екатеринбурге в качестве антигололедных смесей используются: в парках – пескосоляная смесь (с содержанием песка >70 %), для автодорог – Бионорд (гранулы из нескольких видов

солей с низким, <3 %, содержанием твердого осадка после растворения), для тротуаров – мелкофракционный щебень, по минеральному составу представляющий собой местные выветрелые серпентиниты [49]. Мелкофракционный щебень легко разрушается и превращается в пыль; после холодного периода ча-

стично удаляется с поверхностей, однако в виде пыли может также поступать в водоемы. В целом результаты исследований химического состава комплекса жидких природных сред показывают более высокую техногенную нагрузку на экосистему Харитоновского сада практически по всем компонентам.

**Таблица.** Химический состав осадков, поверхностного стока и природных вод водоемов г. Екатеринбурга, мг/л  
**Table.** Chemical composition of environmental compartments in catchments and reservoirs in Ekaterinburg: snow-dirt sludge (SDS), snow, ice and water, mg/l

Объект Studied object		pH, ед./units	Eh <sub>SHE</sub> , мВ/mV	TDS	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca	Mg	Na	K
Чемоданчик Chemodanchik n=18	Вода/Water	7,8	48,5	142	83,0	5,0	14,5	10,6	<0,6	12,0	11,0	7,2	3,9
	Лед/Ice	7,2	111	114	68,4	9,0	8,2	10,5	0,9	14,0	6,9	5,4	2,5
	Снег/Snow	8,5	31,7	47,3	24,9	4,2	3,8	7,3	1,6	5,8	4,0	0,90	0,60
	СГП/SDS	7,4	62,0	39,6	15,3	<3,0	8,0	6,3	1,8	5,8	1,8	2,9	0,51
Харитоновский Kharitonovsky n=12	Вода/Water	7,4	90,7	414	178	9,0	60,1	74,2	2,5	18,7	51,4	25,3	5,5
	Лед/Ice	8,6	25,3	156	52,9	22,0	24,3	31,9	2,9	11,3	24,3	9,5	2,0
	Снег/Snow	8,6	27,3	53,0	18,3	3,7	7,6	14,2	2,2	4,5	5,3	2,5	0,60
	СГП/SDS	6,7	102	72,0	34,5	<6,0	10,9	7,2	1,9	7,5	2,43	7,0	2,4
Фон в городе (снег), Фон 1 Background in the city, snow (Bkg 1)		6,5	120	26,8	11,5	<3,0	1,6	6,4	1,6	5,1	0,60	0,90	0,81
Фон за городом (снег), Фон 2 Background outside the city, snow (Bkg 2)		6,8	135	39	22	<3,0	2,7	3,8	0,3	5,8	0,30	4,2	0,19

Примечание: СГП – снеготрясая пульпа.

Note: SDS – snow-dirt sludge.

По гидрохимическому типу (рис. 3) изученные воды водоемов гидрокарбонатные кальциевые либо гидрокарбонатные магниевые (с учетом только доминирующего иона). В анионном составе атмосферных осадков и природных вод доминирует гидрокарбонат-ион (рис. 3), сульфат-ион и хлорид-ион занимают подчиненное положение в разных пропорциях – от 8 до 34 мг-экв/% в анионном составе. Для природных сред, приуроченных к водоему в Харитоновском саду, отмечается более высокая доля хлорид-ионов. Нитрат-ион фиксируется на уровне <3 мг/л практически во всех средах (что значительно ниже санитарных нормативов для питьевых вод), при этом какой-то определенной тенденции либо зависимости от макрокомпонентного состава не наблюдалось. Отношение Ca/Mg в снеготалой воде городской территории в 10–20 раз выше фоновых значений (Фон 2). Повышение содержания кальция и магния в катионном составе проб с водосборов и водоемов сопровождается сдвигом соотношения Ca/Mg в снеготалой воде относительно фоновых значений. Можно полагать, что повышенные концентрации магния определяются его более легкой растворимостью в компонентах терригенного сноса, а также расходом кальция при вторичном минералообразовании в воде при достижении равновесия и насыщения по отношению к его основным минералам [64]. Хлоридный натриевый состав жидкой фазы СГП подтверждает предположение о связи аномально высокой минерализации СГП с объездной автодороги с наличием антигололедных реагентов.

Закономерности миграции урана и тория в системе «водосбор–водоем»

Содержание природных радионуклидов в компонентах среды варьировалось в широких пределах (рис. 4). Максимальные концентрации U определены

в поровых водах донных отложений пруда Харитоновского сада (8,9 мкг/л, максимум – 20 мкг/л), Th – в жидкой фазе СГП водосбора водоема в Харитоновском саду (0,3 мкг/л). Природные среды распределились в рядах по убыванию:

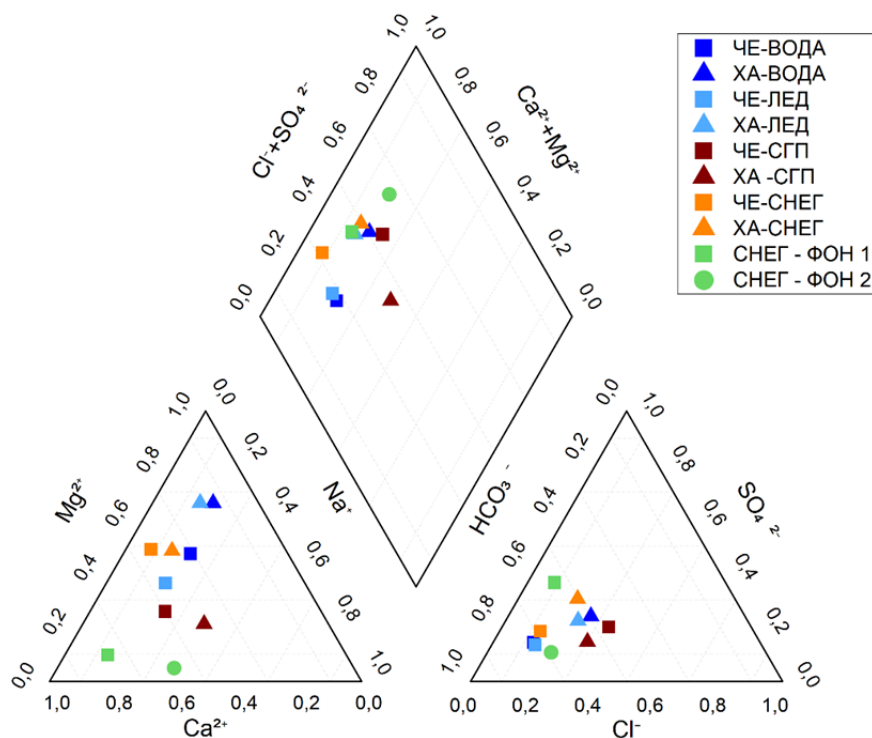
- содержания Th: СГП>поровые растворы>вода водоемов>снег>лед водоемов;
- содержания U: поровые растворы>вода водоемов>СГП>лед водоемов>снег.

Компоненты комплекса природных сред «снег – лед – вода – поровая вода» в трансект-катене Харитоновского сада содержали больше U. Концентрации Th в данной трансект-катене были более высокими для СГП и снега. Анализ макрокомпонентного состава проб подтверждает более интенсивное поступление пыли с водосбора в водоем. Содержание U, как более подвижного элемента [60], в указанных природных средах также подтверждает эти выводы. На единство источников поступления указывает слабо изменяющийся параметр Th/U, несмотря на то, что концентрации обоих элементов меняются в диапазоне 2–3 порядков даже без учета фоновых проб. Значение Th/U в довольно узком интервале 0,01–0,05 преобладало для всех сред. Максимальное отношение Th/U наблюдалось в СГП на тропинке Харитоновского сада, обильно посыпанной антигололедной песчаной смесью, содержащей минералы с повышенной концентрацией тория.

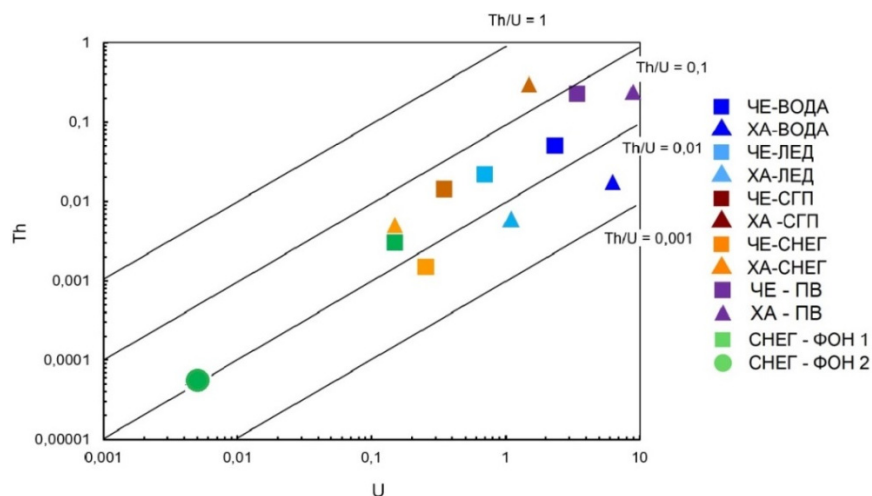
Анализ связи показателей катионно-анионного состава компонентов окружающей среды зимнего сезона водоемов и водосборов позволяет выявить роль поверхностных вод в формировании геохимических условий обследованных водоемов, переноса в весенний сезон талого снега с накопившимися за зиму в нем элементами с водосборов в водоем. Связи макро-



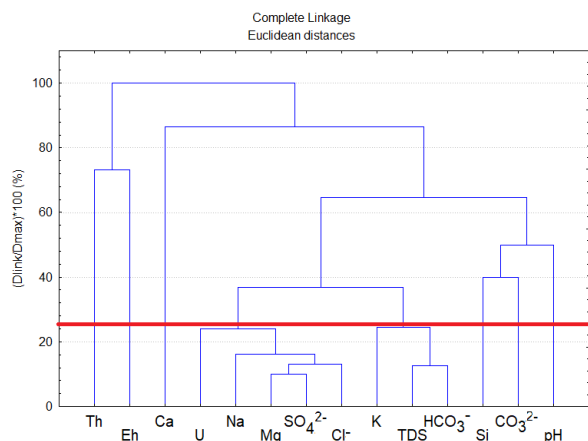
связи с гидрохимическими параметрами, что подтверждается другими исследованиями [64]. Концентрация Th в части образцов льда и снега была близка к пределу обнаружения, что могло повлечь за собой более высокую погрешность измерений. Это затрудняло интерпретацию результатов и поиск статистически значимых корреляций. Описанные далее связи между Th и гидрохимическими показателями могут рассматриваться только как оценочные.



**Fig. 3.** Piper diagram with data on the chemical composition of the studied objects and background points. Here and after (Fig. 4) triangular symbols are referred to Kharitonovsky garden pond (XA), square ones are referred to Chemo-danchik (4E), water samples are highlighted in dark blue, ice samples are in light blue, snow is in orange, liquid phase of the SDS is in brown, background samples are in green



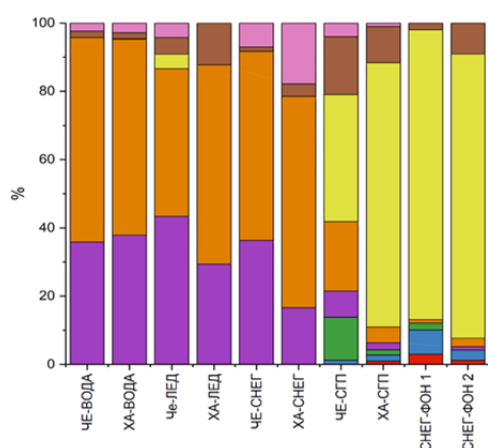
**Fig. 4.** *Th and U content (µg/l) and their ratio in the environmental components of the reservoirs of Ekaterinburg. ПБ – pore waters (highlighted in purple)*



**Рис. 5.** Дендрограмма связей физико-химических параметров с распределением природных радионуклидов в составе жидких компонентов природных сред. Статистически значимые связи – ниже красной линии

**Fig. 5.** Dendrogram of the relationship between water chemistry and the distribution of natural radionuclides in the liquid environmental samples. Statistically significant correlation is below the red line

По термодинамическим расчетам (рис. 6) преобладающими формами миграции U в жидких компонентах в диапазоне измеренных гидрохимических по-



**Рис. 6.** Формы нахождения U и Th в жидких природных средах (в количестве вещества >1 %)

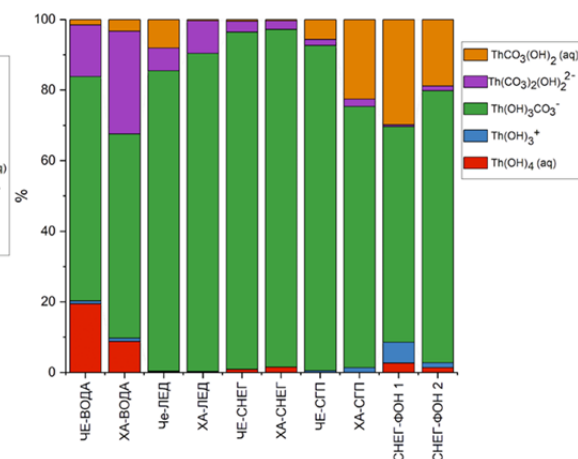
**Fig. 6.** Aqueous species of U and Th in liquid samples (>1 mol %)

Диаграммы Пурбэ для тория [56] в водных растворах показывают наиболее вероятную форму нахождения  $\text{ThO}_{2(\text{cr})}$  (торианит; базы данных LNLL, JNC-TDB и др.) в окислительно-восстановительных условиях широкого диапазона, перекрывающего значения, характерные для почти любых природных вод. Поэтому наличие Th в растворе определяется исключительно наличием комплексообразователей. Формирование торианита, несмотря на высокие индексы насыщения, сомнительно ввиду крайне малых количеств этого радиоактивного элемента. Поэтому механизм переноса этого элемента, скорее всего, будет преимущественно сорбционным [65, 66].

В поровых растворах геохимические особенности поведения U и Th, интенсивность их миграции будут

казателей во всех случаях будут уранилкарбонатные комплексы. При этом для воды, льда и снега доминирующей формой нахождения является уранилкарбонат кальция с подчиненным положением гидратированного уранилкарбоната кальция. Вероятно, предпочтительное формирование простых карбонатных комплексов U над тройными в пробах жидкой фазы снега и СГП связано с пониженными содержаниями кальция и более низкими значениями pH (<7,0). Рассчитанные формы нахождения Th слабо менялись в зависимости от типа растворов. Во всех случаях доминирующими формами нахождения Th были смешанные карбонат-гидроксильные комплексы в разных соотношениях.

Отсутствие тесной связи между гидрокарбонатами и U, несмотря на то, что они являются его доминирующей миграционной формой (уранилкарбонатные комплексы), обсуждалось и ранее [64]. Содержание компонентов карбонатной системы выше 10 мг/л является избыточным для формирования уранилкарбонатных комплексов и далее уже не оказывает влияния на распределение U, его вынос из пород и другие гипергенные процессы. Появление значимых долей гидроксидных комплексов и силикатов уранила среди форм нахождения U в фоновых пробах снега также подтверждает данный вывод.



информативны для понимания их ремобилизации и повторного включения в геохимические циклы урбо-экосистемы, скорости попадания в грунтовые воды. Изменение концентраций изучаемых радиоактивных элементов в поровых растворах (рис. 7) было неоднозначным, и для урана – даже хаотичным. На глубине донных отложений 16–20 см фиксируется локальный максимум как радиоактивного цезия (достигая уровня 312 Бк/кг), так и ряда тяжелых металлов [67].

Верхний слой донных осадков (0–5 см) обогащен растворенными в поровых водах соединениями U. Для водоема в Харитоновском саду установлен максимум содержаний U и Th в поровых водах на глубине 20 см. Более высокие концентрации U в поровых растворах верхнего слоя донных осадков, вероятно,

имеют гидрогенное происхождение. В зимне-весенний сезон кислородный и температурный режим в придонном слое водоемов определяют градиент концентраций поллютантов на поверхности раздела

фаз «вода – донный осадок», что приводит к диффузионному потоку элементов в поровые воды из придонного слоя воды [68].

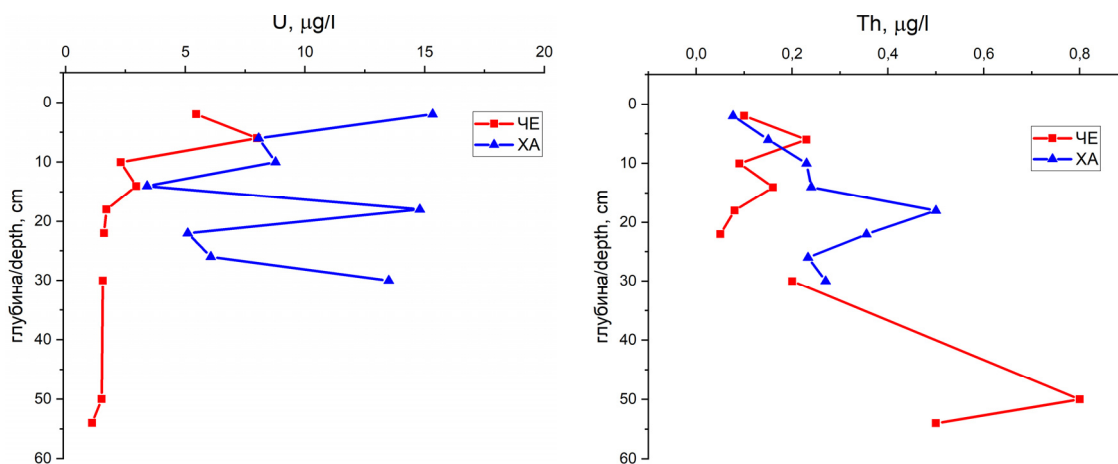


Рис. 7. Вертикальное распределение концентраций урана и тория в поровых водах донных отложений городских водоемов Екатеринбурга: ЧЕ – водоем Чесменский, ХА – водоем Харитоновского сада

Fig. 7. Vertical distribution of U and Th concentrations in the pore waters of bottom sediments of Ekaterinburg reservoirs: ЧЕ – the Chernomorskiy pond, ХА – the Kharitonovskiy garden pond

В целом с точки зрения антропогенного влияния на формирование колонки донных осадков городских водоемов часто возможны нерегулярные залповые сбросы терригенного материала. Резко отличающиеся по количеству осадков и снежности зимы могут существенно повлиять на изменение геохимических условий маленьких водоемов Екатеринбурга. Не со-

всем корректно сравнивать эти водоемы с природными озерами, которые изучены более детально. Однако особенности поведения элементов в поровых растворах и донных осадках связаны с их минеральным составом (рис. 8), который тоже менялся с глубиной неоднозначно из-за особенностей функционирования водоемов в условиях городской среды.

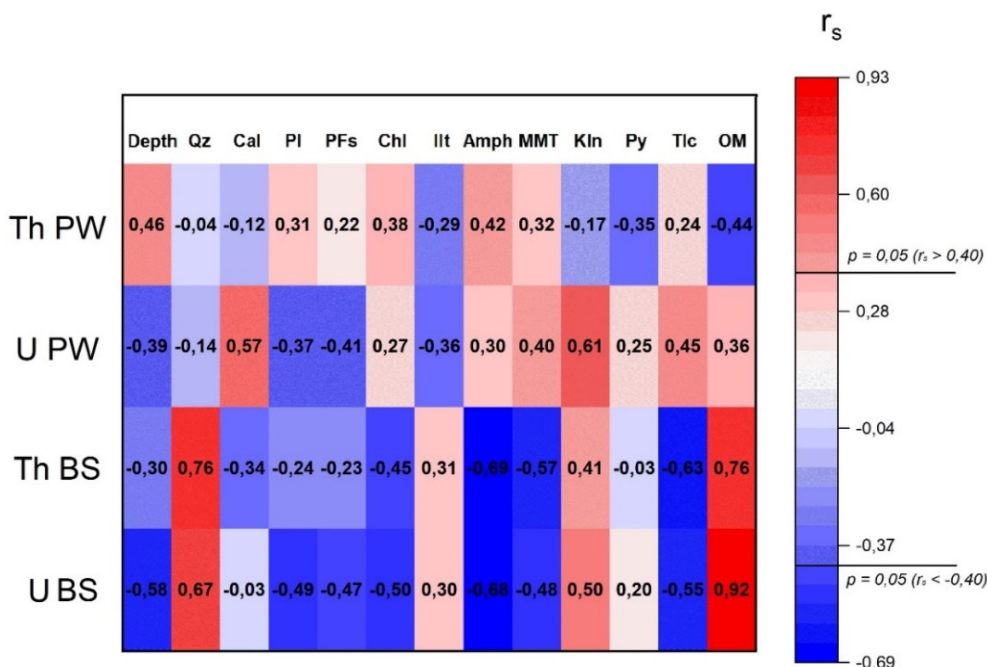
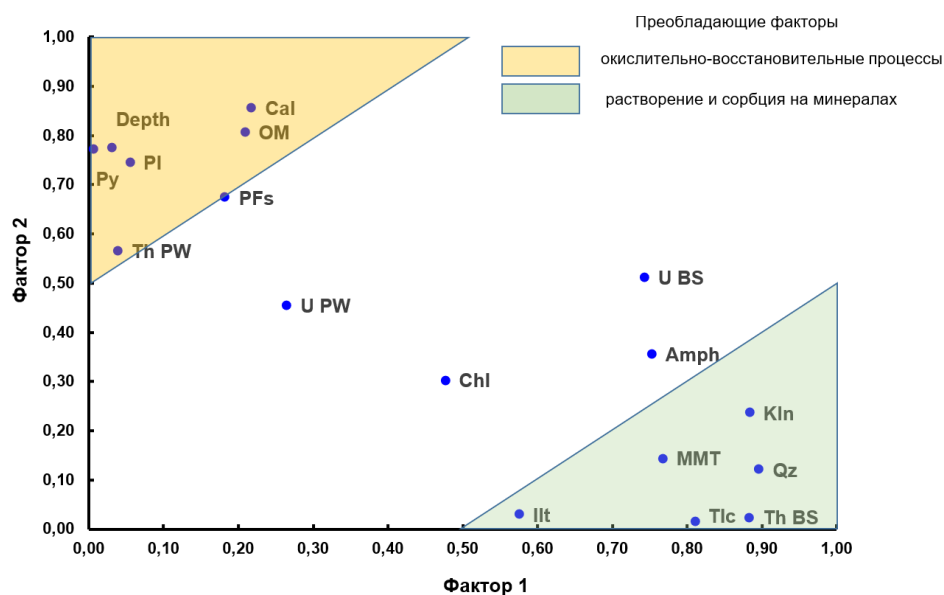


Рис. 8. Коэффициенты корреляции Спирмена между ураном и торием в поровых растворах, донных осадках и их минеральным составом. Название минералов дано по классификации IMA-CNMNC. PW – поровые воды, BS – донные отложения, Depth – глубина, OM – органическое вещество

Fig. 8. Spearman correlation coefficients between uranium, thorium in pore solutions, bottom sediments and their mineral composition. Minerals abbreviation is given according to the IMA-CNMNC. PW – pore waters, BS – bottom sediments, OM – organic matter

Коэффициент корреляции Спирмена между ураном и торием в поровых растворах, донных осадках и их минеральным составом показал, что U и Th непосредственно в самих донных осадках более достоверно связаны с минеральным составом в донных отложениях. На рис. 8 с ростом доли кварца (Qz) и органического вещества (OM) содержание обоих элементов в донных осадках растет сочетанно. Отрицательные корреляции природных радионуклидов в донных осадках установлены с амфиболом (Amph), тальком (Tlc), монтмориллонитом (MMT), хлоритом (Chl). С глубиной концен-

трация Th в поровых растворах возрастала, а содержание урана в самих донных осадках снижалось. Факторные нагрузки связи естественных радионуклидов в поровых водах донных отложений с минеральным составом, глубиной отбора и долей органического вещества донных осадков показаны на рис. 9. По характеру группировки минералов донных осадков окислительно-восстановительные процессы и сорбционные свойства минералов выступают как отдельные факторы, определяющие миграцию природных радиоактивных элементов в системе «поровые воды – донные осадки».



**Рис. 9.** Факторные нагрузки зависимостей распределения естественных радионуклидов в поровых водах (PW), донных отложениях (BS) от минерального состава, глубины отбора (Depth) и доли органического вещества (OM) донных осадков

**Fig. 9.** Factor loads of the dependences of the distribution of natural radionuclides in pore waters (PW), bottom sediments (BS) on the mineral composition, sampling depth (Depth) and the proportion of organic matter (OM) of bottom sediments

В донных осадках водоема Чемоданчик отсутствуют такие минералы, как кальцит (Cal) и монтмориллонит (MMT), обладающие высокой сорбционной емкостью по отношению к радионуклидам, но преобладает каолин (Kln). Вероятно, это не единственная причина таких существенных различий, поскольку и другие минералы вносят вклад в распределение урана и тория между донными осадками и поровыми растворами вниз по профилю. По силе влияния на распределение Th в донных осадках на ведущее место выходит ассоциация глинистых минералов и кварц. При этом содержание Th в поровых водах меняется с глубиной (подтверждается и корреляционным анализом), наличием либо отсутствием в колонке кальцита, органического вещества и пирита (Py). На распределение U в изучаемых компонентах донных осадков оказывают влияние оба обозначенных фактора. Влияние ассоциации «пирит – органическое вещество – глубина» проявлено в большей степени именно на подвижный уран, находящийся в поровом растворе. В то же время влияние содержания глинистых минералов в большей степени проявилось на валовом содержании урана в донных осадках.

### Заключение

На основе анализа проб, отобранных в зимне-весенний сезон, определены условия перераспределения естественных радионуклидов в системе «водосбор–водоем» с учетом гидрохимических показателей в городских водоемах Екатеринбурга. Воды изученных водоемов слабощелочные пресные и ультрапресные, по гидрохимическому типу гидрокарбонатные кальциевые. Гидрокриогенные компоненты характеризуются как щелочные и слабощелочные ультрапресные, гидрокарбонатные магниевые. Поверхностные наносы (снегогрязевая пульпа) по составу околонеутральные ультрапресные гидрокарбонатные магниевые, за исключением аномальных точек с хлоридно-натриевым составом и минерализацией до 4000 мг/л.

В обследованных трансект-катенах градиент концентрации урана направлен от осадков водосбора к воде водоемов и далее незначительно увеличивается в поровых растворах. Самый значимый источник тория в изученной системе – снегогрязевая пульпа. Природные воды и осадки не изменяют подвижность тория, однако в поровых растворах с возможной сменой

окислительно-восстановительной обстановки его подвижность может снова увеличиваться.

Водоёмы являются депонирующим резервуаром для радионуклидов и обогащены ураном и торием в десятки раз по сравнению с осадками и поверхностным стоком (снегопылевые массы). Наблюдается сохранение соотношения Th/U в комплексе природных сред, которое слегка варьируется в интервале Th/U=0,01–0,05. Доминирующими формами миграции природных радионуклидов в изученных компонентах городского акваландшафта являются: для урана – тройные (с Са) и простые уранилкарбонатные комплексы, для тория – карбонат-гидроксильные комплексы. Поровые растворы донных отложений содержат уран и торий в более высоких концентрациях, чем вода водоёмов.

Такие минералы донных осадков, как пирит, монтмориллонит и кальцит, наряду с органическим веществом, определяют поведение природных радионуклидов и их мобилизацию в донных осадках городских водоёмов Екатеринбурга. Присутствие в терри-

генном материале минералов с высокой сорбционной способностью будет усиливать роль донных осадков как сорбционного барьера для радионуклидов, однако уран может мигрировать транзитно с компонентами органического вещества. В системе «бессточный водоём – его водосбор» сопряжённое опробование компонентов окружающей среды, как части трансект-катены, адекватно отражает связь между геохимическими условиями водосбора и водоёма и позволяет численно охарактеризовать поступление поллютантов при снеготаянии в весенний период.

*Полевые, лабораторные и аналитические работы на территории Екатеринбурга проведены в рамках выполнения работ по гранту РФФИ № 19-35-60011. Работа А.С. Торопова по моделированию форм нахождения радиоактивных элементов и интерпретации гидрогеохимических данных исследования оплачена из средств гранта РФФИ № 19-33-60030. ИСП-МС анализ содержаний урана и тория (Окунева Т.Г.), а также рентгенофазовый (Рянская А.Д.) и термический анализы выполнены в рамках г/б темы №123011800012-9 ИГТ УрО РАН.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V. Study of urban puddle sediments for understanding heavy metal pollution in an urban environment // *Environmental Technology & Innovation*. – 2014. – V. 1–2. – P. 1–7.
2. Peirce J.J., Weiner R.F., Vesilind P.A. Nonpoint source water pollution // *Environmental Pollution and Control*. – 1997. – V. 1. – P. 137–143.
3. Basic Information about Nonpoint Source (NPS) Pollution. URL: <https://www.epa.gov/nps/basic-information-about-nonpoint-source-nps-pollution> (дата обращения 29.11.2022).
4. Polluted Runoff: Nonpoint Source (NPS) Pollution. URL: <https://www.epa.gov/nps> (дата обращения 29.11.2022).
5. The pollution conveyed by urban runoff: a review of sources / A. Müller, H. Österlund, J. Marsalek, M. Viklander // *Science of The Total Environment*. – 2020. – V. 709. – P. 136125.
6. Urban snow indicates pollution originating from road traffic / K. Kuoppamäki, H. Setälä, A.-L. Rantalainen, D.J. Kotze // *Environmental Pollution*. – 2014. – V. 195. – P. 56–63.
7. Challenges of the «Anthropocene» / A. Chin, T. Beach, S. Luzzader-Beach, W.D. Solecki // *Anthropocene*. – 2017. – V. 20. – P. 1–3.
8. Taylor K.G., Owens P.N. Sediments in urban river basins: a review of sediment-contaminant dynamics in an environmental system conditioned by human activities // *J Soils Sediments*. – 2009. – V. 9. – P. 281–303.
9. Russell K.L., Vietz G.J., Fletcher T.D. Global sediment yields from urban and urbanizing watersheds // *Earth-Science Reviews*. – 2017. – V. 168. – P. 73–80.
10. Russell K.L., Vietz G.J., Fletcher T.D. Urban catchment runoff increases bedload sediment yield and particle size in stream channels // *Anthropocene*. – 2018. – V. 23. – P. 53–66.
11. Russell K.L., Vietz G.J., Fletcher T.D. A suburban sediment budget: coarse-grained sediment flux through hillslopes, stormwater systems and streams // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2019. – V. 44. – P. 2600–2614.
12. A landscape study of sediment formation and transport in the urban environment / I. Yarmoshenko, G. Malinovsky, E. Baglaeva, A. Seleznev // *Atmosphere*. – 2020. – V. 11. – P. 1320–1342.
13. Илгашева Е.О. Техногенные микросферы в поверхностном осадке урбанизированных территорий // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 3. – С. 57–67.
14. Chemical profiling of PM10 from urban road dust / C.A. Alves, M. Evtyugina, A.M.P. Vicente, E.D. Vicente, T.V. Nunes, P.M.A. Silva, M. Duarte, C. Pio, F. Amato, X. Querol // *Sci Total Environ*. – 2018. – V. 634. – P. 41–51.
15. Fugitive road dust PM2.5 emissions and their potential health impacts / S. Chen, X. Zhang, J. Lin, J. Huang, D. Zhao, T. Yuan, K. Huang, Y. Luo, Z. Jia, Z. Zang Y. Qiu, L. Xie // *Environ Sci Technol*. – 2019. – V. 53. – P. 8455–8465.
16. Taylor K. Urban environments // *Environmental sedimentology* / Eds. C. Perry, K. Taylor. – Hoboken, NJ, USA: Wiley-Blackwell, 2007. – P. 190–222.
17. Transferring innovative erosion and sediment control research results into industry practice / M.A. Perez, W.C. Zech, W.N. Donald, R. Turochy, B.G. Fagan // *Water*. – 2019. – V. 11. – P. 2549.
18. Yoon B., Woo H. Sediment problems in Korea // *J Hydraul Eng*. – 2000. – V. 126. – P. 486–491.
19. Systematic evaluation framework and empirical study of the impacts of building construction dust on the surrounding environment / H. Yan, G. Ding, K. Feng, L. Zhang, H. Li, Y. Wang, T. Wu // *J Clean Prod*. – 2020. – V. 275. – P. 122767.
20. Poepl R.E., Keesstra S.D., Maroulis J. A conceptual connectivity framework for understanding geomorphic change in human-impacted fluvial systems // *Geomorphology*. – 2017. – V. 277. – P. 237–250.
21. Knox E.G., Bouchard C.E., Barrett J.G. Erosion and Sedimentation in Urban Areas. In *Agronomy Monograph*. – Madison, WI, USA: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Science Society of America, 2000. – 296 p.
22. Connectivity as an emergent property of geomorphic systems / E. Wohl, G. Brierley, D. Cadol, T.J. Coulthard, T. Covino, K.A. Fryirs, G. Grant, R.G. Hilton, S.N. Lane, F.J. Magilligan, K.M. Meitzen, P. Passalacqua, R.E. Poepl, S.L. Rathburn, L.S. Sklar // *Earth Surf Process. Landf*. – 2018. – V. 44. – P. 4–26.
23. Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations / T. Heckmann, M. Cavalli, O. Cerdan, S. Foerster, M. Javaux, E. Lode, A. Smetanova, D. Vericat, F. Brardinoni // *Earth Sci Rev*. – 2018. – V. 187. – P. 77–108.
24. Mahoney D.T., Fox J.F., Al Aamery N. Watershed erosion modeling using the probability of sediment connectivity in a gently rolling system // *J Hydrol*. – 2018. – V. 561. – P. 862–883.
25. Russell K.L., Vietz G.J., Fletcher T.D. Urban sediment supply to streams from hillslope sources // *Science of The Total Environment*. – 2019. – V. 653. – P. 684–697.
26. Perez M.A., Zech W.C., Donald W.N., Fang X. Design methodology for the selection of temporary erosion and sediment control practices based on regional hydrological conditions // *J Hydrol Eng*. – 2016. – V. 21. – P. 05016001.
27. Review of historical street dust and dirt accumulation and washoff data / R.E. Pitt, D. Williamson, J. Voorhees, S. Clark, P.S. Harrisburg // *Journal of Water Management Modeling*. – 2005. – V. 1. – P. 203–246.



28. Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P. Assessment of total amount of surface sediment in urban environment using data on solid matter content in snow-dirt sludge // *Environ. Process.* – 2019. – V. 6. – P. 581–595.
29. Do snow and ice alter urban air quality? / P.A. Ariya, A. Dastoor, Y. Nazarenko, M. Amyot // *Atmospheric Environment.* – 2018. – V. 186. – P. 266–268.
30. Characterizing the PAHs in surface waters and snow in the Athabasca region: Implications for identifying hydrological pathways of atmospheric deposition / S.J. Birks, S. Cho, E. Taylor, Y. Yi, J.J. Gibson // *Science of The Total Environment.* – 2017. – V. 603–604. – P. 570–583.
31. Metal contamination of short-term snow cover near urban crossroads: Correlation analysis of metal content and fine particles distribution / M.V. Vasić, A. Mihailović, U. Kozmidis-Luburić, T. Nemes, J. Ninkov, T. Zeremski-Skorić, B. Antić // *Chemosphere.* – 2012. – V. 86. – P. 585–592.
32. Aerosol and snow transfer processes: an investigation on the behavior of water-soluble organic compounds and ionic species / E. Barbaro, R. Zangrando, S. Padoan, O. Karroca, G. Toscano, W.R.L. Cairns, C. Barbante, A. Gambaro // *Chemosphere.* – 2017. – V. 183. – P. 132–138.
33. Snow-dirt sludge as an indicator of environmental and sedimentation processes in the urban environment / A. Seleznev, I. Yarmoshenko, G. Malinovsky, E. Ilgasheva, E. Baglaeva, A. Ryanskaya, D. Kiseleva, T. Gulyaeva // *Sci Rep.* – 2019. – V. 9. – P. 17241.
34. Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale / U. Förstner, S. Heise, R. Schwartz, B. Westrich, W. Ahlf // *Journal of Soils and Sediments.* – 2004. – V. 4. – P. 247–260.
35. Селезнев А.А., Тетерин А. Ф., Ярмошенко И.В. Метеорологические условия формирования поверхностного стока наносов в период весеннего снеготаяния в городской среде // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2020. – Т. 331. – № 2. – С. 7–16.
36. Dauvalter V.A., Kashulin N.A. Mercury pollution of lake Imandra sediments, the Murmansk Region, Russia // *International Journal of Environmental Research.* – 2018. – V. 12. – P. 939–953.
37. Sediment geochemistry of the urban Lake Paulo Gorski / M.B. Remor, S.C. Sampaio, S. de Rijk, M.A. Vilas Boas, J.T. Gortardo, E.T. Pinto, F.A. Schardong // *International Journal of Sediment Research.* – 2018. – V. 33. – P. 406–414.
38. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  / V. Putyrskaya, E. Klemt, S. Röllin, J.A. Corcho-Alvarado, H. Sahli // *Journal of Environmental Radioactivity.* – 2020. – V. 212. – P. 106135.
39. Hanfi M.Y., Yarmoshenko I., Seleznev A.A. Gross alpha and gross beta activity concentrations in the dust fractions of urban surface-deposited sediment in Russian cities // *Atmosphere (Basel).* – 2021. – V. 12 (5). – P. 571–578.
40. Gross alpha activity in urban sediments as an important indicator of urban environmental processes on the example of three Russian cities / M.Y. Hanfi, I.V. Yarmoshenko, E.O. Ilgasheva, A.D. Onishchenko, A.A. Seleznev, A.D. Ryanskaya // *J. Environ. Manage.* – 2021. – V. 294. – P. 113011.
41. Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V., Sergeev A.P.  $^{137}\text{Cs}$  in puddle sediments as timescale tracer in urban environment // *J Environ Radioact.* – 2015. – V. 142. – P. 9–13.
42. Торопов А.С., Рихванов Л.П., Есильканов Г.М. Пространственное распределение форм нахождения радионуклидов в воде ручья Карабулак Семипалатинского испытательного полигона // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2017. – Т. 328. – № 12. – С. 6–15.
43. Геохимическая модель накопления урана в русле реки Семизбай (Северо-Казахстанская урановорудная провинция) / А.В. Карпов, О.Л. Гаськова, А.Г. Владимиров, И.Ю. Анникова, И.Н. Мороз // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2023. – Т. 334. – № 1. – С. 165–176.
44. Uranium anomalies in recent sediments of lakes from the northern part of the Murmansk Region, Arctic / Z.I. Slukovskii, A.V. Guzova, V.A. Dauvalter, V.N. Udachin, D.B. Denisov // *Geochemistry International.* – 2020. – V. 58 (12). – P. 1374–1378.
45. Иванов А.Ю., Арбузов С.И. Геохимия урана и тория в донных отложениях малых искусственных водоемов и озер на территории юга Томской области // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 136–146.
46. Артамонова С.Ю. Уран и торий в аэрозольных выпадениях г. Новосибирска и его окрестностей (Западная Сибирь) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 212–223.
47. Радиоактивные (Th, U) и редкоземельные элементы в природных водах центрального Сихотэ-Алия (Приморский край) / А.В. Ветошкина, И.Ю. Чекрызов, А.М. Паничев, Е.А. Вах, Н.В. Барановская, Т.Н. Луценко // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 45–56.
48. Озеро Эбейты, Россия: химико-органический и минеральный состав воды и донных отложений / М.Н. Колпакова, О.Л. Гаськова, О.С. Наймушина, С.К. Кривоногов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2018. – Т. 329. – № 1. – С. 111–123.
49. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист О-41. – Екатеринбург. Объяснительная записка. – СПб.: Картография ВСЕГЕИ, 2011. – 492 с.
50. Устинов М.Т. Катенография и эколого-мелиоративная оценка почвенного покрова методом трансект-катен // *Сибирский экологический журнал.* – 2001. – Т. 8. – № 3. – С. 285–291.
51. Эколого-гидрохимические особенности современных техногенных водоемов (на примере Уральского региона) / О.М. Гуман, А.Б. Макаров, И.А. Антонова, Г.Г. Хасанова // *Вестник ВГУ. Серия: Геология.* – 2018. – № 1. – С. 148–154.
52. Extraction and Characterization of Pore Water in Contaminated Soils // *Environmental Geochemistry 2<sup>nd</sup> ed. Chapter 10* / M. Di Bonito, N. Breward, N. Crout, B. Smith, S.D. Young, H. Zhang. – Amsterdam: Elsevier B.V., 2018. – P. 195–235.
53. Rhizon sampling of porewaters near the sediment-water interface of aquatic systems / J. Seeborg-Elverfeldt, M. Schlüter, T. Feseker, M. Kölling // *Limnology and Oceanography: Methods.* – 2005. – V. 3. – P. 361–371.
54. Даувальтер В.А. Геоэкология донных отложений озер. – Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. – 242 с.
55. Reiller P.E., Descostes M. Development and application of the thermodynamic database PRODATA dedicated to the monitoring of mining activities from exploration to remediation // *Chemosphere.* – 2020. – V. 251. – P. 126301.
56. Торопов А.С., Солдатова Е.А., Рихванов Л.П. Формы миграции радионуклидов (U и Th) в природных водах в различных геохимических условиях на основе расчетных и экспериментальных данных // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 7–21. DOI: 10.18799/24131830/2020/12/2935
57. Effect of thermodynamic database selection on the estimated aqueous uranium speciation / X. Wang, Z. Shi, D.G. Kinniburgh, L. Zhao, S. Ni, R. Wang, Y. Hou, K. Cheng, B. Zhu // *Journal of Geochemical Exploration.* – 2019. – V. 204. – P. 33–42.
58. Zhang J., Luo X. Bioaccumulation characteristics and acute toxicity of uranium in *Hydrodictyon reticulatum*: An algae with potential for wastewater remediation // *Chemosphere.* – 2022. – V. 289. – P. 133189.
59. Makarov V.N. Negative anomalies of the redox (reduction-oxidation) potential in the snow cover of residential areas (Yakutsk as an example) // *Ice and Snow.* – 2020. – V. 60 (4). – P. 513–520.
60. The characteristics and sources apportionment of water-soluble ions of PM<sub>2.5</sub> in suburb Tangshan, China / B. Wang, Z. Tang, N. Cai, H. Niu // *Urban Climate.* – 2021. – V. 35. – P. 100742.
61. Tracing the biogenic secondary organic aerosol markers in rain, snow and hail / G. Spolnik, P. Wach, K.J. Rudziński, R. Szmigielski, W. Danikiewicz // *Chemosphere.* – 2020. – V. 251. – P. 126439.
62. Assessment of PM<sub>2.5</sub>-bound nitrogen-containing organic compounds (NOCs) during winter at urban sites in China and Korea / K.-S. Jang, M. Choi, M. Park, M.H. Park, Y.H. Kim, J. Seo, Y. Wang, M. Hu, M.-S. Bae, K. Park // *Environmental Pollution.* – 2020. – V. 265 (B). – P. 114870.
63. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы / Н.С. Касимов, Д.В. Власов, Н.Е. Кошелева, Е.М. Никифорова. – М.: АПР, 2020. – 276 с.



64. Торопов А.С., Есильканов Г.М. Современные инструменты выявления геохимических зависимостей миграции радионуклидов в природных водах // Геохимия. – 2022. – Т. 67. – № 3. – С. 238–252. DOI: 10.31857/S0016752522010113
65. Effects of soil pH and organic matter on distribution of thorium fractions in soil contaminated by rare-earth industries / P. Guo, T. Duan, X. Song, J. Xu, H. Chen // Talanta. – 2008. – V. 77 (2). – P. 624–627.
66. Martínez-Aguirre A., García-León M., Ivanovich M. U and Th speciation in river sediments // Science of the Total Environment. – 1995. – V. 173–174. – P. 203–239.
67. Селезнев А.А., Рянская А.Д., Окунева Т.Г. Геохимические характеристики компонентов окружающей среды водосборов и малых водоемов урбанизированной среды // Геология, география и глобальная энергия. – 2022. – № 3 (86). – С. 137–156.
68. Кудрявцева В.А., Шигаева Т.Д., Панкратова Н.М. Особенности миграции тяжелых металлов в системе «придонная вода – поровая вода – поверхностный слой донных отложений» прибрежной зоны восточной части Финского залива в весенне-летний период // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 95–104.
- Поступила: 30.11.2022 г.  
Прошла рецензирование: 28.03.2023 г.

#### Информация об авторах

**Селезнев А.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, лаборатория урбанизированной среды, Институт промышленной экологии УрО РАН; доцент, кафедра безопасности жизнедеятельности, Институт фундаментального образования, Уральский федеральный университет.

**Торопов А.С.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник кафедры радиохимии химического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

**Окунева Т.Г.**, младший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН.

**Киселева Д.В.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН; доцент, кафедра безопасности жизнедеятельности, Институт фундаментального образования, Уральский федеральный университет.

**Ярмошенко И.В.**, кандидат физико-математических наук, директор, лаборатория урбанизированной среды, Институт промышленной экологии УрО РАН.

**Рянская А.Д.**, младший научный сотрудник, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН.

UDC 556.551:577.53:550.424.6:550.461:546.79

## MIGRATION OF NATURAL RADIONUCLIDES IN THE SYSTEM «HYDROCRYOGENIC COMPONENTS – WATER – PORE WATER OF BOTTOM SEDIMENTS» IN URBAN WATER BODIES

Andrian A. Seleznev<sup>1,2</sup>,  
sandrian@rambler.ru

Andrey S. Toropov<sup>3</sup>,  
torop990@gmail.com

Tatiana G. Okuneva<sup>4</sup>,  
okunevatatjana@mail.ru

Daria V. Kiseleva<sup>4,2</sup>,  
podarenka@mail.ru

Ilia V. Yarmoshenko<sup>1</sup>,  
ivy@ecko.uran.ru

Anastasia D. Ryanskaya<sup>4</sup>,  
tosenka2008@gmail.com

<sup>1</sup> Institute of Industrial Ecology UB RAS,  
20, S. Kovalevskaya street, Ekaterinburg, 620990, Russia.

<sup>2</sup> Ural Federal University,  
19, Mira street, Ekaterinburg, 620002, Russia.

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University,  
1, Leninskie Gory street, Moscow, 119234, Russia.

<sup>4</sup> Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS,  
15, Akademik Vonsovsky street, Ekaterinburg, 620110, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the necessity of obtaining information on the behavior of natural radionuclides under urban landscape conditions during contemporary sedimentation. In particular, there are no complete data on the following issues: influence of physical and chemical properties of urban environmental components on the transfer of radionuclides in the system «catchment – water body», accumulation of natural radionuclides during sediment runoff from the catchment of urbanized environment into the bottom sediments during the long-term period, patterns and geochemical features of natural radionuclides behavior in the system «hydrocryogenic components – water of water bodies – pore solutions of bottom sediments».

**The main aim** of the research is to identify the migration patterns of natural radionuclides in the system «catchment-watershed» in the urban area during the formation of sediment runoff.

**Objects:** waterbody, catchment, natural waters, snow, ice, snow-dirt sludge, chemical composition of environmental objects, uranium and thorium content.

**Methods:** water chemistry analyzed by means of a set of methods: potentiometric titration, spectrophotometry, flame photometry and mass spectrometry (ICP-MS). The mineral composition of the rocks was determined using a powder X-ray diffraction (XRD).

**Results.** Data on the hydrochemical characteristics of selected water bodies of the urban environment and their catchments were obtained. The waters of water bodies are enriched with U and Th in orders of magnitudes in comparison with water fraction surface runoff and precipitations. Dominant forms of migration of natural radionuclides in the studied components of the urban landscape were determined. Uranium forms are represented in the form of uranyl carbonate complexes of different composition, thorium – by carbonate-hydroxyl complexes. Relationships between physico-chemical and hydrochemical indicators of environmental components in the system «cutoff basin – undrained reservoir» were revealed. Trends and mechanisms that may affect the formation of the geochemical situation of water bodies, pollution of water and bottom sediments were identified. Pore solutions of bottom sediments contain uranium and thorium in higher concentrations than in water bodies. Such minerals of bottom sediments as pyrite, montmorillonite and calcite along with organic matter determine the behavior of natural radionuclides and their mobilization in the bottom sediments of urban water bodies in Ekaterinburg.

### Key words:

uranium, thorium, snow, snow-dirt sludge, pore water, water migration, aqueous species, urban environment, contemporary sedimentation, tracer.

*Fieldwork and analytical studies on the territory of Ekaterinburg city was carried out as part of the work under RFBR grant no. 19-35-60011. The work of A.S. Toropov on the thermodynamic modeling of the aqueous species of radioactive elements and hydrochemistry data interpreting was paid for from the funds of the RFBR grant no. 19-33-60030. ICP-MS analysis of U and Th (Tatyana G. Okuneva), XRD (Anastasiya D. Ryanskaya) and thermal analysis are supported by the State assignment of Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS No. 123011800012-9.*

### REFERENCES

1. Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V. Study of urban puddle sediments for understanding heavy metal pollution in an urban environment. *Environmental Technology & Innovation*, 2014, vol. 1–2, pp. 1–7.
2. Peirce J.J., Weiner R.F., Vesilind P.A. Nonpoint source water pollution. *Environmental Pollution and Control*, 1997, vol. 1, pp. 137–143.
3. Basic Information about Nonpoint Source (NPS) Pollution. Available at: <https://www.epa.gov/nps/basic-information-about-nonpoint-source-nps-pollution> (assessed 29 November 2022).
4. Polluted Runoff: Nonpoint Source (NPS) Pollution. Available at: <https://www.epa.gov/nps> (assessed 29 November 2022).
5. Müller A., Österlund H., Marsalek J., Viklander M. The pollution conveyed by urban runoff: a review of sources. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 709, pp. 136125.

6. Kuoppamäki K., Setälä H., Rantalainen A.-L., Kotze D.J. Urban snow indicates pollution originating from road traffic. *Environmental Pollution*, 2014, vol. 195, pp. 56–63.
7. Chin A., Beach T., Luzzadder-Beach S., Solecki W.D. Challenges of the «Anthropocene». *Anthropocene*, 2017, vol. 20, pp. 1–3.
8. Taylor K.G., Owens P.N. Sediments in urban river basins: a review of sediment–contaminant dynamics in an environmental system conditioned by human activities. *J Soils Sediments*, 2009, vol. 9, pp. 281–303.
9. Russell K.L., Vietz G.J., Fletcher T.D. Global sediment yields from urban and urbanizing watersheds. *Earth-Science Reviews*, 2017, vol. 168, pp. 73–80.
10. Russell K.L., Vietz G.J., Fletcher T.D. Urban catchment runoff increases bedload sediment yield and particle size in stream channels. *Anthropocene*, 2018, vol. 23, pp. 53–66.
11. Russell K.L., Vietz G.J., Fletcher T.D. A suburban sediment budget: coarse-grained sediment flux through hillslopes, stormwater systems and streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, vol. 44, pp. 2600–2614.
12. Yarmoshenko I., Malinovsky G., Baglaeva E., Seleznev A. A Landscape Study of Sediment Formation and Transport in the Urban Environment. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, pp. 1320.
13. Ilgasheva E.O. Technogenic microspheres in surface sediments of urban areas. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 3, pp. 57–67. In Rus.
14. Alves C.A., Evtugina M., Vicente A.M.P., Vicente E.D., Nunes T.V., Silva P.M.A., Duarte M., Pio C., Amato F., Querol X. Chemical profiling of PM10 from urban road dust. *Sci Total Environ*, 2018, vol. 634, pp. 41–51.
15. Chen S., Zhang X., Lin J., Huang J., Zhao D., Yuan T., Huang K., Luo Y., Jia Z., Zang Z., Qiu Y., Xie L. Fugitive road dust PM2.5 emissions and their potential health impacts. *Environ Sci Technol*, 2019, vol. 53, pp. 8455–8465.
16. Taylor K. Urban environments. *Environmental sedimentology*. Eds. C. Perry, K. Taylor. Hoboken, NJ, USA, Wiley-Blackwell, 2007. pp. 190–222.
17. Perez M.A., Zech W.C., Donald W.N., Turochy R., Fagan B.G. Transferring Innovative Erosion and Sediment Control Research Results into Industry Practice. *Water*, 2019, vol. 11, pp. 2549.
18. Yoon B., Woo H. Sediment problems in Korea. *J Hydraul Eng*, 2000, vol. 126, pp. 486–491.
19. Yan H., Ding G., Feng K., Zhang L., Li H., Wang Y., Wu T. Systematic evaluation framework and empirical study of the impacts of building construction dust on the surrounding environment. *J Clean Prod*, 2020, vol. 275, pp. 122767.
20. Poepl R.E., Keesstra S.D., Maroulis J. A conceptual connectivity framework for understanding geomorphic change in human-impacted fluvial systems. *Geomorphology*, 2017, vol. 277, pp. 237–250.
21. Knox E.G., Bouchard C.E., Barrett J.G. *Erosion and sedimentation in urban areas* Agronomy monograph. Madison, WI, USA, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2015. pp. 179–197.
22. Wohl E., Briery G., Cadol D., Coulthard T.J., Covino T., Fryirs K.A., Grant G., Hilton R.G., Lane S.N., Magilligan F.J., Meitzen K.M., Passalacqua P., Poepl R.E., Rathburn S.L., Sklar L.S. Connectivity as an emergent property of geomorphic systems. *Earth Surf Process. Landf*, 2018, vol. 44, pp. 4–26.
23. Heckmann T., Cavalli M., Cerdan O., Foerster S., Javaux M., Lode E., Smetanova A., Vericat D., Brardinoni F. Indices of sediment connectivity: opportunities, challenges and limitations. *Earth Sci Rev*, 2018, vol. 187, pp. 77–108.
24. Mahoney D.T., Fox J.F., Al Aamery N. Watershed erosion modeling using the probability of sediment connectivity in a gently rolling system. *J Hydrol*, 2018, vol. 561, pp. 862–883.
25. Russell K.L., Vietz G.J., Fletcher T.D. Urban sediment supply to streams from hillslope sources. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 653, pp. 684–697.
26. Perez M.A., Zech W.C., Donald W.N., Fang X. Design methodology for the selection of temporary erosion and sediment control practices based on regional hydrological conditions. *J Hydrol Eng*, 2016, vol. 21, pp. 05016001.
27. Pitt R.E., Williamson D., Voorhees J., Clark S., Harrisburg P.S. Review of historical street dust and dirt accumulation and washoff data. *Journal of Water Management Modeling*, 2005, vol. 1, pp. 203–246.
28. Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V., Malinovsky G.P. Assessment of total amount of surface sediment in urban environment using data on solid matter content in snow-dirt sludge. *Environ. Process*, 2019, vol. 6, pp. 581–595.
29. Ariya P.A., Dastoor A., Nazarenko Y., Amyot M. Do snow and ice alter urban air quality? *Atmospheric Environment*, 2018, vol. 186, pp. 266–268.
30. Birks S.J., Cho S., Taylor E., Yi Y., Gibson J.J. Characterizing the PAHs in surface waters and snow in the Athabasca region: Implications for identifying hydrological pathways of atmospheric deposition. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 603–604, pp. 570–583.
31. Vasić M.V., Mihailović A., Kozmidis-Luburić U., Nemes T., Ninkov J., Zeremski-Škorić T., Antić B. Metal contamination of short-term snow cover near urban crossroads: Correlation analysis of metal content and fine particles distribution. *Chemosphere*, 2012, vol. 86, pp. 585–592.
32. Barbaro E., Zangrando R., Padoan S., Karroca O., Toscano G., Cairns W.R.L., Barbante C., Gambaro A. Aerosol and snow transfer processes: an investigation on the behavior of water-soluble organic compounds and ionic species. *Chemosphere*, 2017, vol. 183, pp. 132–138.
33. Seleznev A., Yarmoshenko I., Malinovsky G., Ilgasheva E., Baglaeva E., Ryanskaya A., Kiseleva D., Gulyaeva T. Snow-dirt sludge as an indicator of environmental and sedimentation processes in the urban environment. *Sci Rep*, 2019, vol. 9, pp. 17241.
34. Förstner U., Heise S., Schwartz R., Westrich B., Ahlf W. Historical Contaminated Sediments and Soils at the River Basin Scale. *Journal of Soils and Sediments*, 2004, vol. 4, pp. 247–260.
35. Seleznev A.A., Teterin A.F., Yarmoshenko I.V. Meteorological conditions of surface sediment runoff formation during spring snowmelt in urban environment. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 7–16. In Rus.
36. Dauvalter V.A., Kashulin N.A. Mercury pollution of lake Imandra sediments, the Murmansk Region, Russia. *International Journal of Environmental Research*, 2018, vol. 12, pp. 939–953.
37. Remor M.B., Sampaio S.C., De Rijk S., Vilas Boas M.A., Gotardo J.T., Pinto E.T., Schardong F.A. Sediment geochemistry of the urban Lake Paulo Gorski. *International Journal of Sediment Research*, 2018, vol. 33, pp. 406–414.
38. Putyrskaya V., Klemm E., Röhl S., Corcho-Alvarado J.A., Sahli H. Dating of recent sediments from Lago Maggiore and Lago di Lugano (Switzerland/Italy) using <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 212, pp. 106135.
39. Hanfi M.Y., Yarmoshenko I., Seleznev A.A. Gross alpha and gross beta activity concentrations in the dust fractions of urban surface-deposited sediment in Russian cities. *Atmosphere*, 2021, vol. 12 (5), pp. 571–578.
40. Hanfi M.Y., Yarmoshenko I.V., Ilgasheva E.O., Onishchenko A.D., Seleznev A.A., Ryanskaya A.D. Gross alpha activity in urban sediments as an important indicator of urban environmental processes on the example of three Russian cities. *J. Environ. Manage*, 2021, vol. 294, pp. 113011.
41. Seleznev A.A., Yarmoshenko I.V., Sergeev A.P. <sup>137</sup>Cs in puddle sediments as timescale tracer in urban environment. *J Environ Radioact*, 2015, vol. 142, pp. 9–13.
42. Toropov A.S., Rikhvanov L.P., Yessilkanov G.M. Spatial distribution of radionuclide speciation in Karabulak stream of the Semipalatinsk test site. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 12, pp. 6–15. In Rus.
43. Karpov A.V., Gaskova O.L., Vladimirov A.G., Annikova I.Yu., Moroz E.N. Geochemical model of uranium accumulation in the Semizbay riverbed (Northern Kazakhstan uranium ore province). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 1, pp. 165–176. In Rus.
44. Slukovskii Z.I., Guzeva A.V., Dauvalter V.A., Udachin V.N., Denisov D.B. Uranium anomalies in recent sediments of lakes from the northern part of the Murmansk Region, Arctic. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58 (12), pp. 1374–1378.
45. Ivanov A.Y., Arbuzov S.I. Geochemistry of uranium and thorium in bottom sediments of small artificial water reservoirs and lakes in the south of the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 136–146. In Rus.

46. Artamonova S.Yu. Uranium and thorium in aerosol fallout of Novosibirsk city and its vicinity (West Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 212–223. In Rus.
47. Vetoshkina A.V., Chekryzhov I.Yu., Panichev A.M., Vakh E.A., Baranovskaya N.V., Lutsenko T.N. Radioactive (Th, U) and rare earth elements in natural waters of central Sikhote-Alin (Primorsky Krai). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 45–56. In Rus.
48. Kolpakova M.N., Gaskova O.L., Naymushina O.S., Krivonogov S.K. Ebeity lake, Russia: chemical, organic and mineral composition of water and bottom sediments. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 111–123.
49. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (vetye pokolenie). *Seriya Uralskaya. List O-41 – Ekaterinburg. Obyasnitelnaya zapiska*. [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third ed.). Ural series. Sheet O-41 – Ekaterinburg. Information note]. St. Petersburg, VseGeoI Cartfactory Publ., 2011. 492 p.
50. Ustinov M.T. Katenografiya i ekologo-meliorativnaya otsenka pochvennogo pokrova metodom transekt-katen [Catenography and environmental meliorative assessment of soil cover using catenary complex approach]. *Siberian ecological journal*, 2001, vol. 8, no. 3, pp. 285–291.
51. Guman O.M., Makarov A.B., Antonova I.A., Khasanova G.G. Ekologo-gidrokhimicheskie osobennosti sovremennykh tekhnogennykh vodoemov (na primere Uralskogo regiona) [Environmental and hydrochemical features of contemporary technogenic waterbodies (on the example of Ural region)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, 2018, no. 1, pp. 148–154.
52. Di Bonito M., Breward N., Crout N., Smith B., Young S.D., Zhang H. Extraction and characterization of pore water in contaminated soils. Chapter 10. *Environmental Geochemistry (Second Edition)*. Amsterdam, Elsevier B.V., 2018. pp. 195–235.
53. Seeborg-Elverfeldt J., Schlüter M., Feseker T., Kölling M. Rhizon sampling of porewaters near the sediment-water interface of aquatic systems. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2005, vol. 3, pp. 361–371.
54. Dauwalter V.A. *Geoekologiya donnykh otlozheniy ozer* [Geoecology of bottom sediments of lakes]. Murmansk, MSTU Publ., 2012. 242 p.
55. Reiller P.E., Descostes M. Development and application of the thermodynamic database PRODATA dedicated to the monitoring of mining activities from exploration to remediation. *Chemosphere*, 2020, vol. 251, pp. 126301.
56. Toropov A.S., Soldatova E.A., Rikhvanov L.P. Forms of radionuclides (U and Th) migration in natural waters under different geochemical conditions based on computational and experimental data. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 7–21. In Rus.
57. Wang X., Shi Z., Kinniburgh D.G., Zhao L., Ni S., Wang R., Hou Y., Cheng K., Zhu B. Effect of thermodynamic database selection on the estimated aqueous uranium speciation. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, vol. 204, pp. 33–42.
58. Zhang J., Luo X. Bioaccumulation characteristics and acute toxicity of uranium in *Hydrodictyon reticulatum*: an algae with potential for wastewater remediation. *Chemosphere*, 2022, vol. 289, pp. 133189.
59. Makarov V.N. Negative anomalies of the redox (reduction-oxidation) potential in the snow cover of residential areas (Yakutsk as an example). *Ice and Snow*, 2020, vol. 60 (4), pp. 513–520.
60. Wang B., Tang Z., Cai N., Niu H. The characteristics and sources apportionment of water-soluble ions of PM<sub>2.5</sub> in suburb Tangshan, China. *Urban Climate*, 2021, vol. 35, pp. 100742.
61. Spolnik G., Wach P., Rudziński K.J., Szmigielski R., Danikiewicz W. Tracing the biogenic secondary organic aerosol markers in rain, snow and hail. *Chemosphere*, 2020, vol. 251, pp. 126439.
62. Jang K.-S., Choi M., Park M., Park M.H., Kim Y.H., Seo J., Wang Y., Hu M., Bae M.-S., Park K. Assessment of PM<sub>2.5</sub>-bound nitrogen-containing organic compounds (NOCs) during winter at urban sites in China and Korea. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 265 (B), pp. 114870.
63. Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. *Geokhimiya landshaftov Vostochnoy Moskvy* [Geochemistry of landscapes in Eastern Moscow]. Moscow, APR Publ., 2020. 276 p.
64. Toropov A.S., Yessilkanov G.M. Advanced instruments for identifying geochemical dependences of radionuclide migration in natural waters. *Geochemistry international*, 2022, vol. 60 (3), pp. 266–278.
65. Guo P., Duan T., Song X., Xu J., Chen H. Effects of soil pH and organic matter on distribution of thorium fractions in soil contaminated by rare-earth industries. *Talanta*, 2008, vol. 77 (2), pp. 624–627.
66. Martínez-Aguirre A., García-León M., Ivanovich M. U and Th speciation in river sediments. *Science of the Total Environment*, 1995, vol. 173–174, pp. 203–239.
67. Seleznev A.A., Ryanskaya A.D., Okuneva T.G. Geokhimicheskie kharakteristiki komponentov okruzhayushchey sredy vodosborov i malykh vodoemov urbanizirovannoy sredy [Geochemical characteristics of the environmental components of watersheds and small water bodies of the urbanized environment]. *Geologiya, geografiya i globalnaya energiya*, 2022, no. 3 (86), pp. 137–156.
68. Kudryavtseva V.A., Shigaeva T.D., Pankratova N.M. Features of migration of heavy metals in the system «bottom water – pore water – surface layer of bottom sediments» of the coastal zone in the eastern part of the Gulf of Finland. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 95–104. In Rus.

Received: 30 November 2022.

Reviewed: 28 March 2023.

#### Information about the authors

**Andrian A. Seleznev**, Cand. Sc., senior researcher, Institute of Industrial Ecology UB RAS; associate professor, Ural Federal University.

**Andrey S. Toropov**, Cand. Sc., senior researcher, Lomonosov Moscow State University.

**Tatiana G. Okuneva**, researcher, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS.

**Daria V. Kiseleva**, Cand. Sc., senior researcher, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS; associate professor, Ural Federal University.

**Iliya V. Yarmoshenko**, Cand. Sc., head of Institute, Institute of Industrial Ecology UB RAS.

**Anastasia D. Ryanskaya**, researcher, Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry UB RAS.

УДК 551.482

## РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ НЕЙРОСЕТЕВОГО ПРОГНОЗА ПАВОДКОВЫХ ВОД

Сырымкин Владимир Иванович<sup>1</sup>,  
svi\_tsu@mail.ru

Иваненко Борис Павлович<sup>1</sup>,  
ivanenko\_boris@mail.ru

Клестов Семён Александрович<sup>1</sup>,  
klestov\_simon@mail.ru

Хильчук Мария Денисовна<sup>1</sup>,  
ma6a70@gmail.com

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью разработки современных методов оперативного мониторинга состояния территорий из-за наличия различного рода стихийных явлений, в частности наводнений и паводковых затоплений. Решению этой проблемы уделяется большое внимание государствами, регионами, муниципалитетами и поселениями.

**Цель:** разработка специализированного программного комплекса, предназначенного для решения задач краткосрочного и среднесрочного прогноза уровня паводковых вод на основе оперативных данных гидрологических наблюдений при минимальном наборе входных данных и с возможностью работать с данными аэрокосмических наблюдений.

**Объекты:** участок, на котором происходит слияние рек Томи и Оби и ниже по течению Оби в местах расположения гидрологических постов: пос. Победа, с. Никольское, с. Молчаново.

**Методы:** нейросетевое информационное моделирование.

**Результаты.** Рассмотрена методика создания нейросетевого имитатора, предназначенного для обработки результатов гидрологических измерений и решения широкого круга практических задач, в том числе и прогностических. Разработана оригинальная методика построения обучающих выборок, позволяющая получать результаты при минимальном наборе исходных данных. Исследована эффективность и точностные характеристики нейросетевых алгоритмов при решении задачи прогноза уровня паводковых вод в период с 1 апреля по 30 июня 2011–2017 гг.

### Ключевые слова:

нейросетевое моделирование, прогноз, паводковые воды, численное моделирование, точностные характеристики, методика построения обучающих выборок.

### Введение

Прогнозирование возможности возникновения опасных разливов на реках является сложной многоуровневой задачей, актуальность которой обусловлена состоянием современных хозяйственных систем, их уязвимостью. В зонах, подверженных негативному влиянию паводков и половодий находится большое количество населенных пунктов, критически важных и потенциально опасных объектов инфраструктуры, промышленных предприятий и сельскохозяйственных угодий [1–9].

При этом ущерб от наводнений зависит не только от уровня воды в водоемах и водотоках, а определяется в значительной степени предсказуемостью предстоящего половодья или паводка. Наличие заблаговременной и достаточно точной прогнозной информации позволяет рационально спланировать и провести превентивные мероприятия по недопущению либо минимизации ущерба от наводнений [9–16].

Чтобы смягчить последствия паводков и наводнений, в настоящее время актуальной становится задача разработки новых методов прогнозирования уровня паводковых вод. Одним из таких методов могут стать методы информационного моделирования, реализованные на нейросетевом базисе [17–21].

Следует отметить, что в настоящее время существуют и используются на практике различные методы решения поставленной задачи: статистические [22–24], регрессионные, иначе метод тенденций, метод соответственных уровней, метод соответственных объемов и т. д. Отметим, что использование этих методов требует привлечения значительных объемов априорной информации, а не только измерения уровня на пунктах наблюдений. Что касается нейросетевых методов прогноза уровня паводковых вод, то имеющийся ряд публикаций [3–9] не позволяет судить о точностных характеристиках используемых алгоритмов, а главное о составе и структуре обучающих выборок.

Известно, что в настоящее время основой использования технологии нейроинформатики в приложениях стало моделирование нейронных сетей на персональных компьютерах [25]. На данный момент существует несколько десятков коммерческих и свободно распространяемых программных нейроимитаторов.

Нейропакеты общего назначения являются наиболее распространенными. В нашей стране разработаны такие программы моделирования искусственных нейронных сетей (ИНС) универсального назначения, как NeuroPro красноярской группы «Нейрокомп»,

NeuroShell, Neural Bench. Из зарубежных наиболее известен продукт STATISTICA Neural Networks (SNN) фирмы StatSoft Inc [26].

Необходимо отметить, что они не обладают рядом возможностей для функционирования в составе информационных систем, состоящих из многих нейросетевых блоков, адаптивно настраивающихся и дообучающихся на вновь поступающих данных [27].

Инструменты для разработки нейросетевых приложений являются более сложными программными продуктами, предоставляющими разработчику разнообразные средства создания нейросетевых решателей. Главными отличительными чертами этого вида программных продуктов является расширяемость, возможность создавать отторгаемые нейросетевые модули, которые могут быть использованы в составе любых систем обработки информации, возможность создавать комплексные нейросетевые системы для решения различных прикладных задач. В качестве примера можно привести пакет для построения моделей ИНС в среде MATLAB. Применение этих пакетов, как правило, требует навыков программирования и более глубокого знания методов нейронинформатики [28, 29].

Для построения нейронной сети, ориентированной на решение конкретной задачи, используются процедуры формирования (или создания) нейронных сетей. Эти процедуры обеспечивают ввод указанных характеристик моделей нейронов и структур нейронных сетей. Как правило, в каждой отдельной программе реализована лишь часть из описанных моделей нейронов и нейронных сетей. Каждая группа моделей нейронных сетей может быть использована для решения лишь некоторого ограниченного класса практических задач. Лишь для небольшого числа моделей нейронных сетей существует строгое математическое обоснование возможности их применения для решения конкретных практических задач. В наибольшей степени теоретически проработаны двухслойные нейронные сети с сигмоидальными передаточными функциями.

#### Общая методика разработки специализированных нейропакетов

Исходя из сказанного выше и опираясь на теорему Колмогорова–Арнольда [30, 31] о представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиции непрерывных функций одного переменного и переложенной Хехт–Нильсеном в термины теории нейронных сетей [32, 33], следует утверждение о том, что для представления нескольких переменных может быть использована двухслойная однородная нейронная сеть с сигмоидальными передаточными функциями. В связи со сказанным выше при разработке нейропакета мы на данном этапе исследования остановились на многослойном персептроне.

Обобщая наш опыт построения нейросетевых моделей, сформулируем методику нейросетевого моделирования и опишем её в стандарте IDEF0 [33–40]. На рис. 1 представлен процесс нейросетевого моделирования в виде «чёрного ящика».



Рис. 1. Процесс нейросетевого моделирования в виде «чёрного ящика»

Fig. 1. Neural network modeling in the form of a «black box»

Блок «Построение (коррекция) нейросетевой модели» (рис. 3) не отличается от общепринятых методик нейросетевого моделирования.

Наибольший интерес представляет декомпозиция блока «Построение обучающей выборки», представленная на рис. 4.

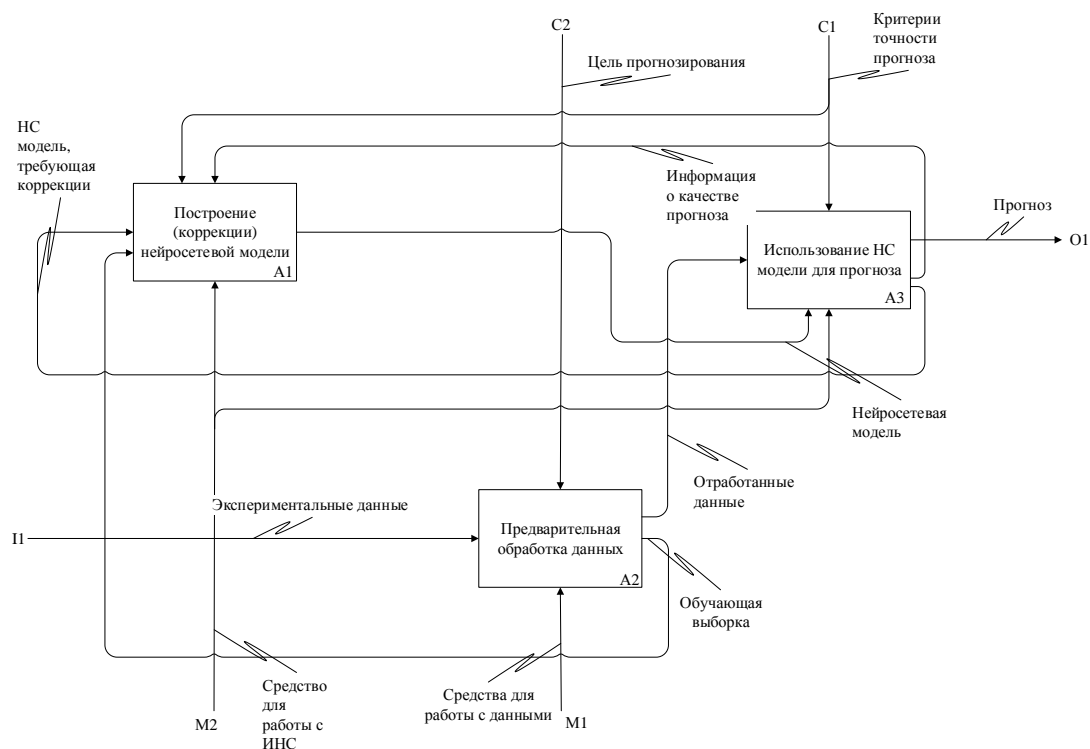
Необходимо дать следующие пояснения к диаграммам: на рис. 2–4 механизм исполнения некоторых процессов является «средство работы с ИНС». На этапе исследований это может быть любой нейромимитатор, однако на стадии промышленного использования это должен быть нейросетевой модуль, встроенный в специализированное программное обеспечение. Средство работы с данными может быть любым, начиная от универсальных, например, таких как Microsoft Excel, до узко специализированных. Особо отметим, что одним из важнейших этапов при разработке нейросетевых методов является исследование устойчивости и точностных характеристик. Устойчивость – одно из важнейших свойств, которым должна обладать модель. Под устойчивостью в данном случае будем понимать способность модели сохранять прогностические свойства на приемлемом уровне погрешностей измерений и при пропусках во входных данных. С этой целью рассматривается схема проведения численного замкнутого эксперимента при исследовании устойчивости и точностных характеристик нейросетевых алгоритмов. Данная схема представлена на рис. 5 в виде функциональной диаграммы описания процессов, выполненной по методологии IDEF0. К данной диаграмме необходимо дать следующие пояснения:

- Обучающая выборка, появляющаяся в результате работы процесса A3, строится на основе экспериментальных данных либо численного моделирования.
- В процессе A2 моделируется погрешность эксперимента. При этом в соответствующие поля обучающей выборки в период обучения вносится заданная случайная относительная погрешность. На период прогноза поля обучающей выборки не «зашумляются».



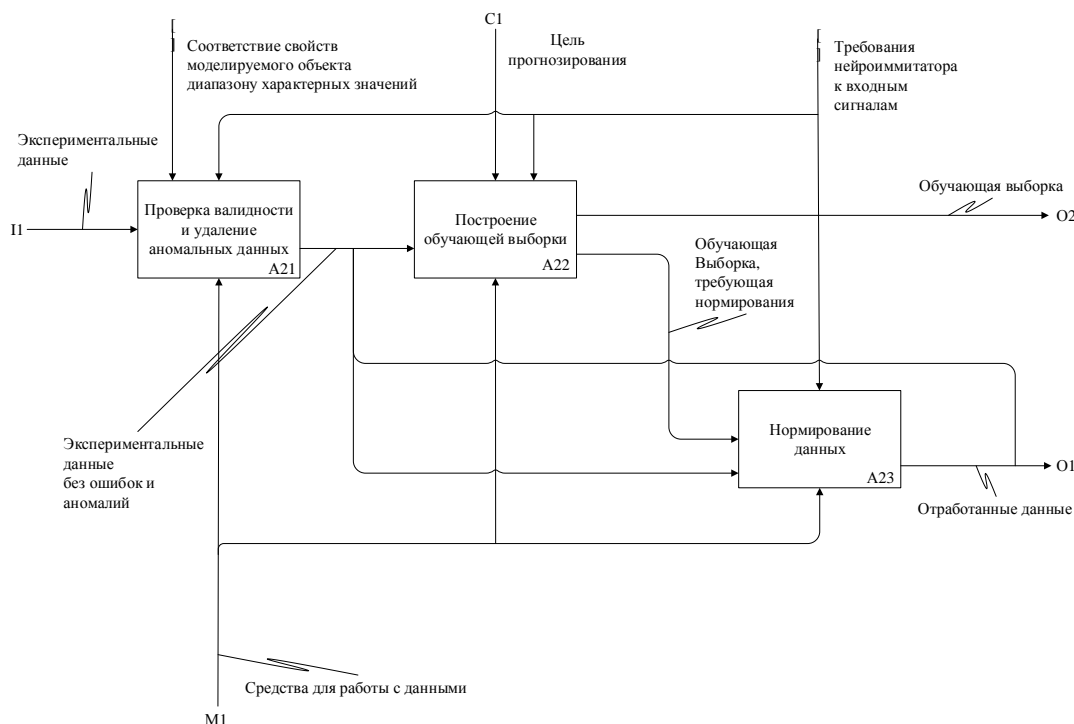
- В A5 на вход обученной нейронной сети подавались данные за весь исследуемый период (обучение–прогноз).
- В A6 рассчитывались соответствующие точностные характеристики, в качестве которых мы использовали: максимальное и среднее отклонение

решения от точного для периода обучения (погрешность обучения) и аналогичные характеристики для прогнозного периода (в нейросетевой терминологии – ошибки обобщения или в общепринятой терминологии – ошибки прогноза).



**Рис. 2.** Основные функциональные блоки нейросетевой модели и связи между ними

**Fig. 2.** The main functional blocks of the neural network model and connections between them



**Рис. 3.** Построение (коррекция) нейросетевой модели

**Fig. 3.** Construction (correction) of the neural network model

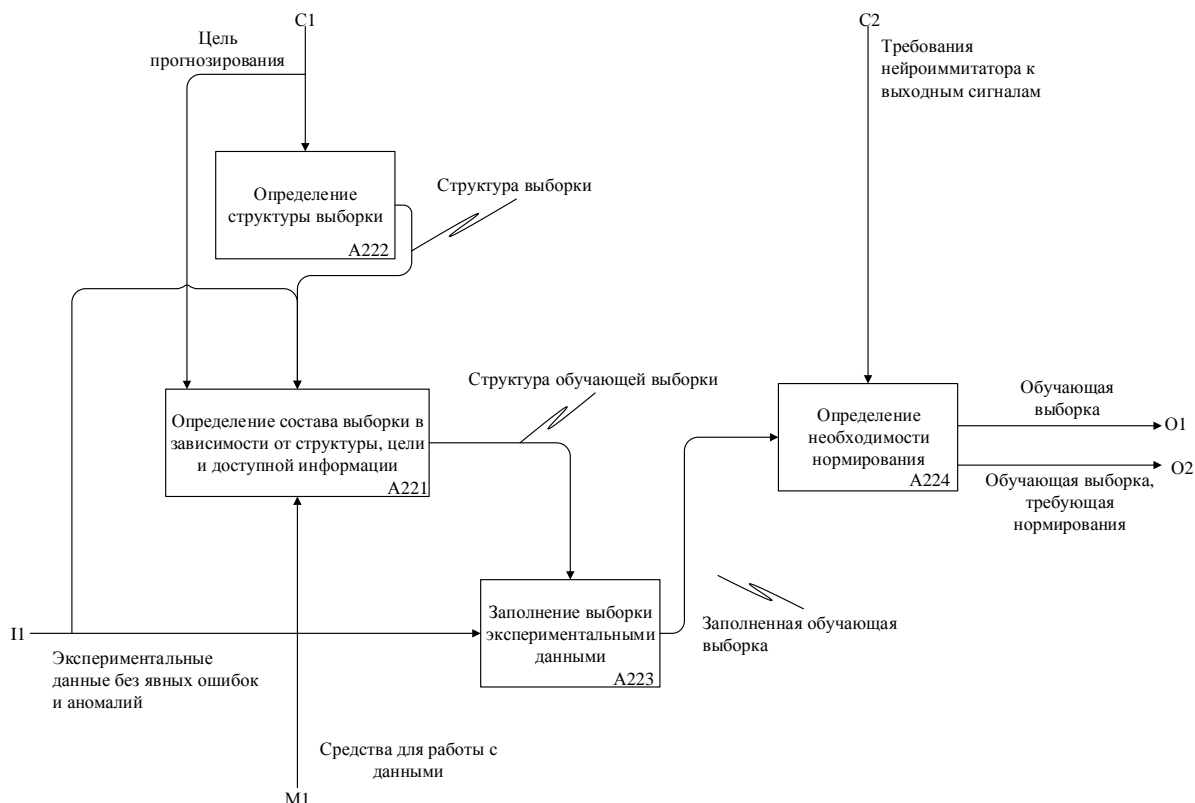


Рис. 4. Декомпозиция функционального блока «Построение обучающей выборки»

Fig. 4. Decomposition of the functional block «Construction of the training sample»

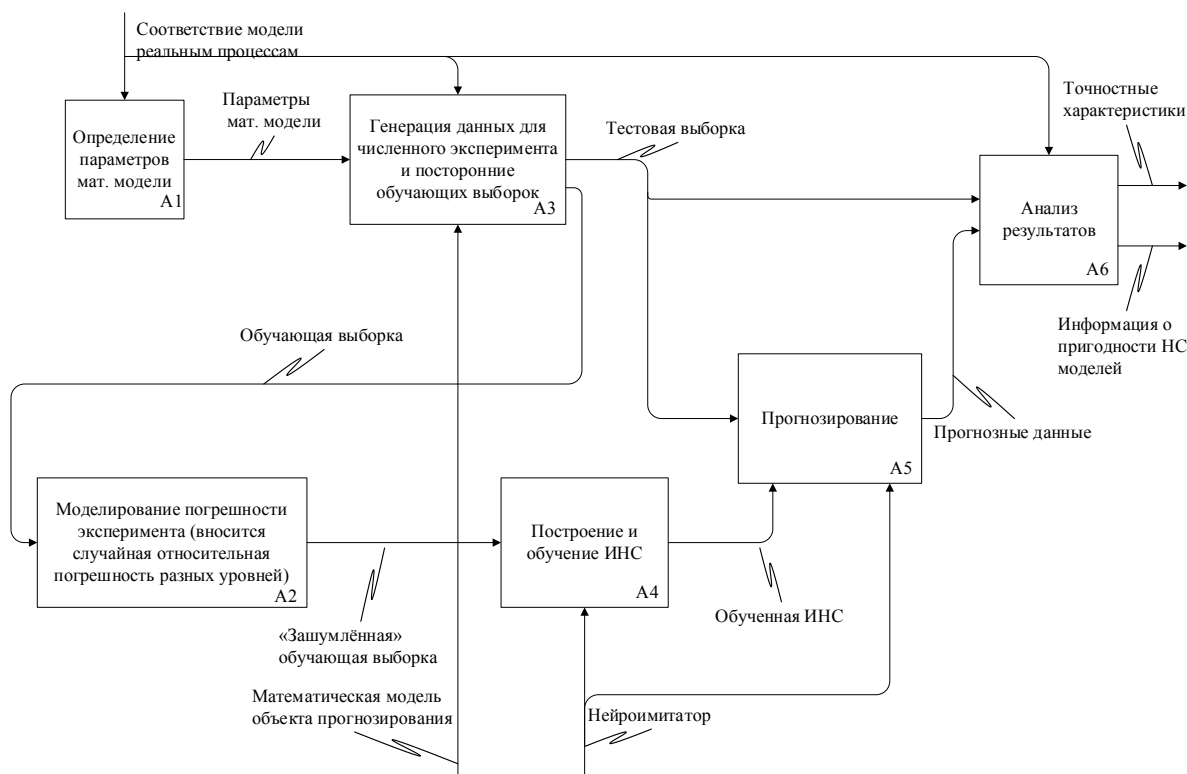


Рис. 5. Диаграмма процессов численного эксперимента, предназначенного для исследования эффективности нейросетевых методов

Fig. 5. Diagram of the processes of a numerical experiment designed to study the effectiveness of neural network methods

Далее приводится описание разрабатываемого нейросетевого программного комплекса (ПК) «NNet», предназначенного для решения задач прогноза паводковых вод. В отличие от описанных выше серийных ПК он должен обеспечивать следующие возможности:

- надежное функционирование в составе информационной системы (ИС) или системы управления;
- автоматизированная обработка данных с минимальным участием пользователя;
- интерфейсная часть нейросетевого модуля, рассчитанная на пользователя, не имеющего специальную подготовку;
- автоматизация построения, обучения и подбора архитектуры нейронной сети;
- автоматизация извлечения знаний из баз данных, отчетов, хранилищ экспериментальной информации;
- периодическое дообучение нейросетевой модели и корректировка архитектуры сети;
- генерация результатов в форматах, пригодных для обобщения и анализа стандартными средствами, использующимися в рентгеноструктурном анализе.

Разрабатываемый ПК «NNet» ориентирован на работу в x86-64 совместимых платформах, что даёт возможность осуществлять взаимодействие пользователя с программой на основе многооконного диалогового интерфейса с развитой системой помощи, соответствующей требованиям GUI (Graphic User Interface) среды Windows, учитывая ресурсоёмкость нейровычислений. Программная реализация данного пакета осуществлена при помощи языка программирования C++. От приложений, основанных на ИНС, требуется значительное быстродействие, особенно на этапе обучения сети, и чем ниже уровень, на котором ведётся разработка, тем обычно выше быстродействие.

В основе разработанного программного средства лежит модель многокомпонентных объектов COM (Component Object Model). COM – это метод разработки программных компонентов, небольших двоичных исполняемых файлов, которые предоставляют необходимые сервисы приложениям, операционным системам и другим компонентам. Компоненты COM объединяются друг с другом для создания приложений или систем компонентов. Компоненты можно отключать и менять во время выполнения без перекомпиляции или перекомпоновки приложения. COM является ядром технологий объектного программирования фирмы Microsoft, известных под названиями OLE, ActiveX, DirectX. COM определяет, каким образом объект (он же компонент, он же сервер) предоставляет свою функциональность использующему его клиенту, как эта функциональность передаётся между процессами и компьютерами, как объекты создаются и уничтожаются и как они идентифицируют себя.

Более подробно о технологии COM можно узнать в работах [41–43], а мы лишь ограничимся перечислением преимуществ технологии COM:

- Полностью независимы от языка программирования. Они могут быть разработаны с помощью

практически любого процедурного языка, включая C, Java, Python. Любой язык, в том числе Visual Basic, можно приспособить к использованию компонентов COM. Можно написать компоненты COM, используемые из языков макрокоманд (например, VB script или Visual Basic for Application).

- Могут распространяться в двоичной форме.
- Могут быть модернизированы без нарушения работы старых клиентов.
- Могут прозрачно перемещаться по сети. Компонент на удалённой системе рассматривается клиентом так же, как компонент на локальном компьютере.

Каждый объект предоставляет свою функциональность через *интерфейсы*, которые являются заранее определённым и неизменным набором методов. Клиент может обратиться к объекту только через реализуемые им интерфейсы – доступа к данным объекта у него нет. Интерфейс, определённый однажды, нельзя изменять. Если нужно пополнить или исправить интерфейс, то следует определить новый интерфейс, возможно, на базе старого.

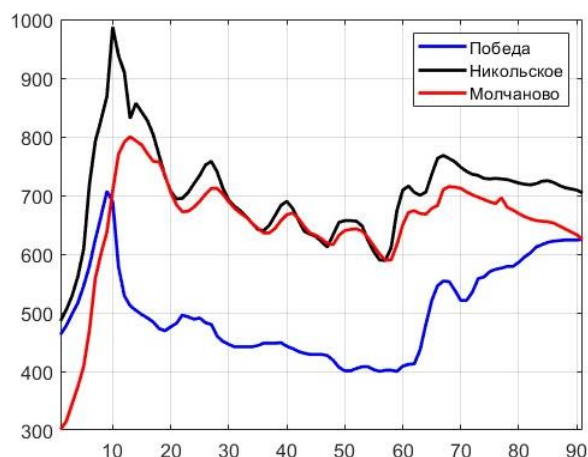
Для сокращения времени разработки и улучшения качества разрабатываемого программного обеспечения использовалась ATL (Active Template Library) – библиотека шаблонов классов C++, позволяющая создавать COM-объекты и содержащая базовые классы, реализующие функциональность, а также классы, реализующие основные интерфейсы OLE и ActiveX.

Разрабатываемые нейросетевые компоненты NetCore и NNetAx позволяют решать следующие задачи:

- Создавать ИНС слоистой архитектуры без обратных связей с любым количеством слоёв любой размерности.
- Выбирать функцию активации для каждого слоя из нижеперечисленных: линейная функция, функция Ферми, рациональная сигмоида, гиперболический тангенс.
- Просматривать весовые матрицы каждого слоя и редактировать весовые коэффициенты.
- Создавать выборки данных любой размерности, выделять в них учебное, проверочное и тестовое множества.
- Редактировать обучающие выборки, импортировать данные из других приложений посредством стандартных механизмов обмена данными.
- Нормировать данные в диапазон  $(-1;1)$ , пригодный к использованию в нейронных сетях.
- Обучать ИНС по алгоритму обратного распространения ошибки и его модификациям [43].
- Использовать момент обучения.
- Параметр обучения (шаг обучения) может подстраиваться случайным образом на каждой эпохе обучения.
- По окончании обучения восстановить значения весовых коэффициентов, при которых была достигнута минимальная ошибка обучения.
- Задавать критерий остановки обучения по количеству эпох или по достижению заданной ошибки обучения.



На рис. 7 приведены результаты наблюдений за уровнем паводковых вод в 2014 г.



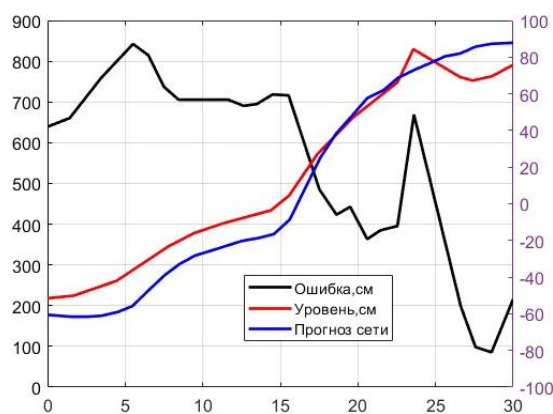
**Рис. 8.** Уровень паводковых вод по данным ежедневных наблюдений для периода с 1 апреля по 1 июня 2014 г.

**Fig. 8.** Flood water level according to daily observations for the period from April 1 to June 1, 2014

Четвертый этап – выбор архитектуры сети и алгоритма ее обучения. В данном случае при решении задачи прогноза использовался многослойный перцептрон с обучением по методу обратного распространения ошибки.

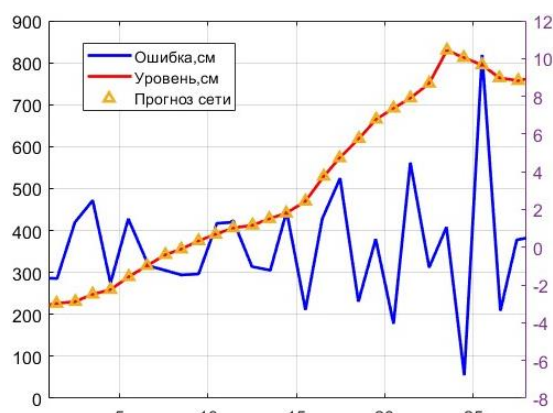
Пятый этап – получение и анализ результатов. На рис. 9, 10 приведены результаты прогноза уровня паводковых вод для п. Молчаново на 2018 г. Здесь по оси ординат нанесены значения уровней паводковых вод в период половодья, а по оси абсцисс – даты наблюдений. При обучении сети использовались лишь данные ежедневных наблюдений за 2011, 2013, 2014, 2015, 2016 и 2017 гг., всего 480 наблюдений за вычетом 60 верификационных примеров, которые выбирались случайным образом. Отметим, что из обучающей выборки исключались данные измерений в 2012 г., т. к. в этом году наблюдался чрезвычайно низкий уровень паводковых вод, что нарушает однородность обучающей выборки. Очевидно, что увеличение размера обучающей выборки позволит снять эту проблему. Что касается полученных результатов, то не вызывает сомнений, что в данном случае полученный результат отрицательный.

В данном случае в состав обучающей выборки входили: года наблюдений (с 2011 по 2017), даты наблюдений для каждого года (с 1 апреля по 1 июня – всего 90 дней), даты наблюдений за весь период наблюдений (всего 540 дней), средние (по годам) значения уровней, отклонение от среднего. Особо отметим, что параметрами обучения в данном случае служили значения уровней и их отклонение от среднего. Полученные результаты показали эффективность предложенного метода построения обучающей выборки с учетом использования дополнительной априорной информации. При этом максимальная ошибка прогноза не превышает 10 см, средняя погрешность равна 0,75 см, а абсолютная средняя ошибка – 2–42 см.



**Рис. 9.** Результаты прогноза уровня паводковых вод для п. Молчаново (без учета априорной информации)

**Fig. 9.** Results of forecasting the level of flood waters for Molchanovo (excluding a priori information)



**Рис. 10.** Результаты прогноза уровня паводковых вод для п. Молчаново (с использованием априорной информации)

**Fig. 10.** Results of forecasting the level of flood waters for Molchanovo (using a priori information)

В Томском государственном университете разработали геоинформационную систему (ГИС), позволяющую в онлайн режиме отслеживать процесс затопления прибрежных населенных пунктов и детально показывать его на картах местности вплоть до домов и улиц. Точность прогноза составляет 10–15 см, что является приемлемым в рамках задачи прогнозирования [22].

В заключение на конкретном примере еще раз рассмотрим вопрос предварительной обработки данных измерений, так как любые экспериментальные данные всегда содержат случайную погрешность, что требует использовать соответствующие методы фильтрации. Отметим, что возможность борьбы со случайными погрешностями измерений заложена в самих нейросетях [34–37], т. е. в их регуляризующих свойствах.

В приложении к нейросетевым моделям регуляризующие методы сводятся к оптимизации функционала ошибки (в простейшем случае – суммы квадратов отклонений модели от экспериментальных значений) с аддитивной добавкой, исчезающей по мере улучшения свойств гладкости функции:

$$E[G] = \sum_{\alpha=1}^{N_{\alpha}} (G(\bar{x}^{\alpha}) - \bar{y}^{(\alpha)})^2 + \lambda \varphi[G].$$

Здесь  $\varphi$  – регуляризующий функционал,  $\lambda$  – параметр регуляризации.

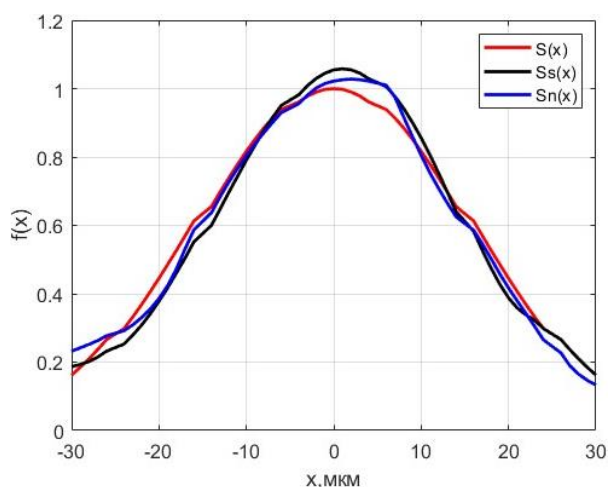


Рис. 11. Пример сигнала, восстановленного на фоне случайных помех

Fig. 11. Example of a signal restored against the background of random noise

В качестве примера приведем результаты восстановления сильно зашумленного сигнала, полученного на рентгеновском томографе (рис. 11). Здесь  $S_d(x)$  представляет собой сумму полезного сигнала и шума,  $S(X)$  – регуляризованные, восстановленные

нейросетью,  $SS(X)$  – точные значения. Выбор данного примера показывает универсальный характер разрабатываемого программного комплекса.

### Заключение

Описана схема создания нейросетевого имитатора как программного пакета, предназначенного для интеграции в информационные системы, системы управления, а также в специализированное программное обеспечение для обработки результатов измерений и решения широкого круга практических задач. Описаны процессы моделирования с нейросетевым имитатором, функциональные блоки самой нейросетевой модели, а также связи между ними, процесс создания обучающей выборки данных с разделением ее на подмножества: обучающее, верификационное, прогнозное. Представлена полная диаграмма разрабатываемого нейроимитатора «NNet» с описанием его свойств. Отметим, что в нем предусмотрен отдельный модуль, предназначенный для проведения замкнутого численного эксперимента, для исследования эффективности и точностных характеристик нейросетевых методов, а также имеется возможность работать с данными аэрокосмических наблюдений. Предложен оригинальный метод построения обучающей выборки, позволивший решить задачу среднесрочного прогноза паводковых вод в период весеннего половодья с точностью порядка 10 см при минимальном наборе исходных данных.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00389, <https://rscf.ru/project/22-19-00389/>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abdulhakim F., Jun F. Prediction of flow flooding in Changhua river based on Time Series Models // 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). – Chengdu, China, 2019. – V. 1. – P. 1663–1669.
2. Dampage U. et al. Artificial neural network for forecasting of daily reservoir inflow: case study of the Kotmale reservoir in Sri Lanka // 2020 5th International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCI). – Haikou, China, 2020. – P. 8–12.
3. Nazari L.F., Camponogara E., Seman L.O. Physics-informed neural networks for modeling water flows in a river channel // IEEE Transactions on Artificial Intelligence. – Australia, University of New South Wales, 2022. – P. 1–15.
4. Zhou Y. et al. Improving the reliability of probabilistic multi-step-ahead flood forecasting by fusing unscented Kalman filter with recurrent neural network // Water. – 2020. – V. 12. – № 2. – P. 578–593.
5. Zainorzuli S.M. et al. Comparative study of Elman Neural Network (ENN) and neural network autoregressive with exogenous input (NARX) for flood forecasting // 2019 IEEE 9th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE). – Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia, 2019. – P. 11–15.
6. Liu J., Feng S. Intelligent forecasting model for hydrological and water resources system // 2019 11th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA). – Qiqihar, China, 2019. – P. 657–661.
7. Zhu C., Ma X. Simulation of flood water level using PSO-based RBF neural network // 2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application. – Nanchang, China, 2009. – V. 1. – P. 68–71.
8. Jhong Y.D. et al. Physical hybrid neural network model to forecast typhoon floods // Water. – 2018. – V. 10. – № 5. – P. 632–649.
9. Tiwari M.K., Chatterjee C. Uncertainty assessment and ensemble flood forecasting using bootstrap based artificial neural networks (BANNs) // Journal of Hydrology. – 2010. – V. 382. – № 1–4. – С. 20–33.
10. Yan J. et al. RBF model applied to forecast the water and sediment fluxes in Lijin section // 2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing. – Tianjin, China, 2009. – P. 1–5.
11. Yuan W.Z., Ya W.X. The BP neural network prediction rudder fall mouth water level and optimization of array parameters // Proceedings of 2012 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology. – Changchun, China, 2012. – P. 1386–1390.
12. Cannas B. et al. Neural network models to forecast hydrological risk // Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN'02 (Cat. No. 02CH37290). – Honolulu, Hawaii, 2002. – V. 1. – P. 423–426.
13. Xinhua C., Zhuying L. The application of neural network technology in floodwater forecast // 2010 International Conference on Networking and Digital Society. – Wenzhou, China, 2010. – V. 2. – P. 419–421.
14. Chaowanawatee K., Heednacram A. Implementation of cuckoo search in RBF neural network for flood forecasting // 2012 fourth international conference on computational intelligence, communication systems and networks. – Phuket, Thailand, 2012. – P. 22–26.
15. Chang F.J. et al. Real-time multi-step-ahead water level forecasting by recurrent neural networks for urban flood control // Journal of Hydrology. – 2014. – V. 517. – P. 836–846.
16. Darras T. et al. Neural network modeling and geochemical water analyses to understand and forecast karst and non-karst part of flash floods (case study on the Lez River, Southern France) // Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences. – 2015. – V. 369. – P. 43–48.
17. Шамсутдинова Т.М. Проблемы нейросетевого и регрессионного прогнозирования уровня паводка рек // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2021. – № 2 (21). – С. 99–105. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.79.13.017.
18. Использование нейросетевых программ для целей прогнозирования (на примере затопления территории Красноярского



- края) / А.К. Москалев, М.Н. Насухин, В.С. Луценко и др. // Экономика и предпринимательство. – 2020. – № 1 (114). – С. 1218–1223.
19. Обзор методов эффективного прогнозирования характеристик речного стока в горных и полугорных районах / Е.В. Гайдукова, В.Г. Маргарян, Н.В. Мякишева и др. // Евразийское Научное Объединение. – 2021. – № 7-4 (77). – С. 324–330. DOI: 10.5281/zenodo.5168514.
20. Ямашкин С.А., Ямашкин А.А., Ямашкина Е.О. Проектно-ориентированные геопортальные системы в решении задачи прогнозирования уровней воды в период весеннего половодья // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 11-1. – С. 75–81. DOI: 10.17513/snt.38891.
21. Нейросетевое моделирование эффективности реагирования на чрезвычайные ситуации в многоуровневой системе управления / Н.Г. Топольский, С.Ю. Бутузов, В.Я. Вилисов, В.Л. Семинов // Технологии техносферной безопасности. – 2021. – № 2 (92). – С. 79–93. DOI: 10.25257/TTS.2021.2.92.79-93.
22. Компьютерное моделирование в онлайн-режиме процесса затопления населенного пункта и поиск наилучших маршрутов для эвакуации населения (на примере деревни Черная речка Томской области) / В.В. Хромых, Д. Накаяма, О.В. Хромых, Е.В. Егорова // Геоморфология и физическая география Сибири в XXI веке: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения заслуженного работника высшей школы Российской Федерации, почетного члена Русского географического общества, профессора, доктора географических наук Земцова Алексея Анисимовича. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2020. – С. 209–213.
23. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978. – 308 с.
24. Бубин М.Н. Прогнозирование паводков летне-осеннего периода // Успехи современного естествознания. – 2014. – № 12-5. – С. 550–553.
25. Горбань А.Н., Россиев Д.А. Нейронные сети на персональном компьютере. – Новосибирск: Наука, 1996. – 276 с.
26. Царегородцев В.Г. Нейроимитатор NEUROPRO // Нейроинформатика и ее приложения: Тез. докл. VI Всероссийского семинара / под ред. А.Н. Горбаня. – Красноярск: КГТУ, 2–5 октября 1998. – С. 207–208.
27. Управление рисками наводнений как составляющая часть интеллектуальной многомерной системы мониторинга территорий / А.Н. Берцун, Б.П. Иваненко, С.А. Клестов, В.И. Сырямкин // Инноватика-2021: сборник материалов XVII Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 22–23 апреля 2021. – Томск: Общество с ограниченной ответственностью «СТТ», 2021. – С. 93–95.
28. Топольский Н.Г., Вилисов В.Я. Методы, модели и алгоритмы в системах безопасности: машинное обучение, робототехника, страхование, риски, контроль. – М.: ООО ИЦ «РИОР», 2021. – 475 с. DOI: 10.29039/02072-2.
29. Виноградов О.В., Морозова О.А. Аспекты применения нейронных сетей для прогнозирования чрезвычайных ситуаций // Технологии гражданской безопасности. – 2021. – Т. 18. – № 1 (67). – С. 23–26. DOI: 10.54234/CST.19968493.2021.18.1.67.4.23.
30. Колмогоров А.Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных суперпозициями непрерывных функций меньшего числа переменных // Докл. АН СССР. – 1956. – Т. 108. – № 2. – С. 179–182.
31. Колмогоров А.Н. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиции непрерывных функций одного переменного // Докл. АН СССР. – 1957. – Т. 114. – № 5. – С. 953–956.
32. Hecht-Nielsen R. Neurocomputing: picking the human brain // IEEE Spectrum, 1988, March. – P. 36–41.
33. Hecht-Nielsen R. Theory of the backpropagation neural network // Neural Networks for Human and Machine Perception / Ed. by H. Wechsler. – Boston, MA: Academic Press, 1992. – V. 2. – P. 65–93.
34. Иваненко Б.П. Нейросетевое имитационное моделирование нефтяных месторождений и гидрогеологических объектов. – Томск: ИД Томского Госуниверситета, 2014. – 186 с.
35. Иваненко Б.П., Клестов С.А., Сырямкин В.И. Нейросетевой прогноз природных ресурсов. На примере реальных нефтяных месторождений, полигонов захоронения ЖРО, прогноза паводковых вод. – Лондон: Изд-во «LAP LAMBERT», 2019. – 190 с.
36. Сырямкин В.И., Шумилов В.Н. Синтез искусственного носителя интеллекта: информационно-биологический подход. 4-е изд., перераб. и доп. – М.; Берлин: ООО «Директ-Медиа», 2021. – 228 с.
37. Syryamkin V.I., Gorbachev S.V., Shikhman M.V. Adaptive fuzzy neural production network with MIMO-structure for the evaluation of technology efficiency // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Tomsk, 22–24 November 2018. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/516/1/012010.
38. Syryamkin V.I., Gorbachev S.V., Shikhman M.V. Adaptive neuro-fuzzy classifier for evaluating the technology effectiveness based on the modified Wang and Mendel fuzzy neural production MIMO-network // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Tomsk, 22–24 November 2018. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/516/1/012037.
39. Горбачев С.В., Сырямкин В.И., Абрамова Т.В. Метод синтеза нейро-нечеткого классификатора на основе дерева решений // Телекоммуникации. – 2018. – № 9. – С. 2–7.
40. Интеллектуальные распределенные системы распознавания образов в комплексах мониторинга, прогноза, диагностики, управления и обеспечения безопасности / В.И. Сырямкин, С.Б. Сунцов, В.С. Титов и др. // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символической информации. Распознавание-2017: сборник материалов XIII Международной научно-технической конференции. – Курск, 16–19 мая 2017. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2017. – С. 336–341.
41. Роджерсон Д. Основы СОМ / пер. с англ. 2-е изд. – М.: Издательско-торговый дом «Русская редакция», 2000. – 400 с.
42. Трелсен Э. Модель СОМ и применение АТЛ 3.0 / пер. с англ. – СПб.: БНВ-Санкт-Петербург, 2000. – 928 с.
43. Горбань А.Н. Быстрое дифференцирование, двойственность и обратное распространение ошибки // Нейроинформатика. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 1998. – 337 с.

Поступила: 24.09.2022 г.

Прошла рецензирование: 08.01.2023 г.

#### Информация об авторах

**Сырямкин В.И.**, доктор технических наук, профессор, Заслуженный изобретатель Российской Федерации, Заслуженный работник Высшей школы РФ, Лауреат Премии Правительства РФ в области образования, заведующий кафедрой управления качеством факультета инновационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Иваненко Б.П.**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Международной лаборатории Систем технического зрения Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Клестов С.А.**, ассистент кафедры управления качеством факультета инновационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Хильчук М.Д.**, инженер Международной лаборатории Систем технического зрения Национального исследовательского Томского государственного университета.

## DEVELOPMENT OF A SPECIALIZED SOFTWARE PACKAGE FOR NETWORK FORECAST OF FLOOD WATERS

Vladimir I. Syryamkin<sup>1</sup>,  
svi\_tsu@mail.ru

Boris P. Ivanenko<sup>1</sup>,  
ivanenko\_boris@mail.ru

Semen A. Klestov<sup>1</sup>,  
klestov\_simon@mail.ru

Maria D. Khilchuk<sup>1</sup>,  
ma6a70@gmail.com

<sup>1</sup> National Research Tomsk State University,  
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to develop modern methods of operational monitoring of the condition of territories due to the presence of various kinds of natural phenomena, in particular, floods and flood inundations. A lot of attention is paid to solving this problem by States, regions, municipalities and settlements.

**Purpose:** development of a specialized software package designed to solve problems of short-term and medium-term flood water level forecasting based on operational data from hydrological observations with a minimum set of input data and with the ability to work with aerospace observation data.

**Objects:** the area where the Tom and Ob rivers merge and downstream of the Ob river at the locations of hydrological posts: villages Pobeda, Nikolskoye, Molchanovo.

**Methods:** neural network information modeling.

**Results.** The paper considers the method of creating a neural network simulator designed for processing the results of hydrological measurements and solving a wide range of practical problems, including prognostic ones. An original method of constructing training samples was developed, which allows obtaining results with a minimum set of initial data. The authors investigated the efficiency and accuracy characteristics of neural network algorithms in solving the problem of forecasting the flood water level in the period from April 1 to June 30, 2011–2017.

### Key words:

neural network modeling, forecast, flood waters, numerical modeling, accuracy characteristics, methods of constructing training samples.

The research was funded with the grant of the Russian Science Foundation no. 22-19-00389, <https://rscf.ru/project/22-19-00389/>.

### REFERENCES

1. Abdulhakim F., Jun F. Prediction of flow flooding in Changhua river based on Time Series Models. *2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*. Chengdu, China, 2019. Vol. 1, pp. 1663–1669.
2. Dampage U. Artificial neural network for forecasting of daily reservoir inflow: case study of the kotmale reservoir in Sri Lanka. *2020 5th International Conference on Computational Intelligence and Applications (ICCIA)*. Haikou, China, 2020. pp. 8–12.
3. Nazari L.F., Camponogara E., Seman L.O. Physics-informed neural networks for modeling water flows in a river channel. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*. Australia, University of New South Wales, 2022. pp. 1–15.
4. Zhou Y. Improving the reliability of probabilistic multi-step-ahead flood forecasting by fusing unscented Kalman filter with recurrent neural network. *Water*, 2020, vol. 12, no. 2, pp. 578–593.
5. Zainorzuli S.M. Comparative study of Elman Neural Network (ENN) and neural network autoregressive with exogenous input (NARX) for flood forecasting. *2019 IEEE 9th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE)*. Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia, 2019. pp. 11–15.
6. Liu J., Feng S. Intelligent forecasting model for hydrological and water resources system. *2019 11th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA)*. Qiqihar, China, 2019. pp. 657–661.
7. Zhu C., Ma X. Simulation of flood water level using PSO-based RBF neural network. *2009 Third International Symposium on Intelligent Information Technology Application*. Nanchang, China, 2009. Vol. 1, pp. 68–71.
8. Jhong Y.D. Physical hybrid neural network model to forecast typhoon floods. *Water*, 2018, vol. 10, no. 5, pp. 632–649.
9. Tiwari M.K., Chatterjee C. Uncertain assessment and ensemble flood forecasting using bootstrap based artificial neural networks (BANNs). *Journal of Hydrology*, 2010, vol. 382, no. 1–4, pp. 20–33.
10. Yan J. RBF model applied to forecast the water and sediment fluxes in Lijin section. *2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing*. Tianjin, China, 2009. pp. 1–5.
11. Yuan W.Z., Ya W.X. The BP neural network prediction rudder fall mouth water level and optimization of array parameters. *Proceedings of 2012 2nd International Conference on Computer Science and Network Technology*. Changchun, China, 2012. pp. 1386–1390.
12. Cannas B. Neural network models to forecast hydrological risk. *Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN'02 (Cat. No. 02CH37290)*. Honolulu, Hawaii, 2002. Vol. 1, pp. 423–426.
13. Xinhua C., Zhuqing L. The application of neural network technology in floodwater forecast. *2010 International Conference on Networking and Digital Society*. Wenzhou, China, 2010. Vol. 2, pp. 419–421.
14. Chaowanawatee K., Heednacram A. Implementation of cuckoo search in RBF neural network for flood forecasting. *2012 fourth international conference on computational intelligence, communication systems and networks*. Phuket, Thailand, 2012. pp. 22–26.
15. Chang F.J. Real-time multi-step-ahead water level forecasting by recurrent neural networks for urban flood control. *Journal of Hydrology*, 2014, vol. 517, pp. 836–846.

16. Darras T. Neural network modeling and geochemical water analyzes to understand and forecast karst and non-karst part of flash floods (case study on the Lez river, Southern France). *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2015, vol. 369, pp. 43–48.
17. Shamsutdinova T.M. Problems of neural network and regression forecasting of river flood levels. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*, 2021, no. 2 (21), pp. 99–105. In Rus. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2021.79.13.017.
18. Moskalev A.K., Nasukhin M.N., Lutsenko V.S. The use of neural network programs for forecasting purposes (on the example of flooding of the territory of the Krasnoyarsk Territory). *Economics and Entrepreneurship*, 2020, no. 1 (114), pp. 1218–1223. In Rus.
19. Gaydukova E.V., Margaryan V.G., Myakisheva N.V. Review of methods for effective forecasting of river runoff characteristics in mountainous and semi-mountainous regions. *Eurasian Scientific Association*, 2021, no. 7-4 (77), pp. 324–330. In Rus. DOI: 10.5281/zenodo.5168514
20. Yamashkin S.A., Yamashkin A.A., Yamashkina E.O. Project-oriented geoport systems in solving the problem of forecasting water levels during the spring flood. *Modern science-intensive technologies*, 2021, no. 11-1, pp. 75–81. DOI: 10.17513/snt.38891.
21. Topolsky N.G., Butuzov S.Yu., Vilisov V.Ya., Semikov V.L. Neural network modeling of the effectiveness of response to emergency situations in a multilevel control system. *Technologies of technosphere safety*, 2021, no. 2 (92), pp. 79–93. In Rus. DOI: 10.25257/TTS.2021.2.92.79-93.
22. Khromykh V.V., Nakayama D., Khromykh O.V., Egorova E.V. Kompyuternoe modelirovanie v onlain režime protsessa zatopeniya naselennogo punkta i poisk nailuchshikh marshrutov dlya evakuatsii naseleniya (na primere derevni Chernaya rechka Tomskoy oblasti) [Computer modeling in online mode of flooding a settlement and the search for the best routes for the evacuation of the population (on the example of the village of Chernaya Rechka, Tomsk Region)]. *Geomorfologiya i fizicheskaya geografiya Sibiri v XXI veke. Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya zaslužennogo rabotnika vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii, pochetnogo chlena Russkogo geograficheskogo obshchestva, professora, doktora geograficheskikh nauk Zemtsova Aleksey Anisimovicha* [Geomorphology and physical geography of Siberia in the XXI century. Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of the honored worker of the higher school of the Russian Federation, honorary member of the Russian Geographical Society, professor, doctor of geographical sciences Alexei Anisimovich Zemtsov]. Tomsk, Tomsk State University Publ. house, 2020, pp. 209–213.
23. Chebotarev A.I. *Gidrologicheskiy slovar* [Hydrological dictionary]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1978. 308 p.
24. Bubin M.N. Forecasting floods of the summer-autumn period. *Successes of modern natural science*, 2014, no. 12-5, pp. 550–553. In Rus.
25. Gorban A.N., Rossiev D.A. *Neyronnye seti na personalnom kompyutere* [Neural networks on a personal computer]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1996. 276 p.
26. Tsaregorodtsev V.G. Neyroimitator NEUROPRO [NEUROPRO neurosimulator]. *Neyroinformatika i ee prilozheniya. Tezisy dokladov VI Vserossiyskogo seminarina* [Neuroinformatics and its applications. Proc. reports of VI All-Russian Seminar]. Ed. by A.N. Hunchback. Krasnoyarsk, October 2–5, 1998. pp. 207–208.
27. Bertsun A.N., Ivanenko B.P., Klestov S.A., Syryamkin V.I. Upravlenie riskami navodneniy kak sostavlyayushchaya chast intellektualnoy mnogomernoy sistemy monitoringa territoriy [Flood risk management as a component of an intelligent multidimensional monitoring system for territories]. *Innovatika-2021. Sbornik materialov XVII Mezhdunarodnoy shkoly-konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh* [Innovatika-2021. Collection of materials of the XVII International School-Conference of students, graduate students and young scientists]. Tomsk, April 22–23, 2021. Tomsk, STT Limited Liability Company Publ., 2021. pp. 93–95.
28. Topolsky N.G., Vilisov V.Ya. *Metody, modeli i algoritmy v sistemakh bezopasnosti: mashinnoe obuchenie, robototekhnika, strakhovanie, riski, kontrol* [Methods, models and algorithms in security systems: machine learning, robotics, insurance, risks, control]. Moscow, OOO IC «RIOR» Publ., 2021. 475 p. DOI: 10.29039/02072-2.
29. Vinogradov O.V., Morozova O.A. Aspects of the use of neural networks for forecasting emergency situations. *Tekhnologii grazhdanskogo bezopasnosti*, 2021, vol. 18, no. 1 (67), pp. 23–26. In Rus. DOI: 10.54234/CST.19968493.2021.18.1.67.4.23.
30. Kolmogorov A.N. On the representation of continuous functions of several variables by superpositions of continuous functions of a smaller number of variables. *Dokl. Academy of Sciences of the USSR*, 1956, vol. 108, no. 2, pp. 179–182. In Rus.
31. Kolmogorov A.N. On the representation of continuous functions of several variables as a superposition of continuous functions of one variable. *Dokl. AN USSR*, 1957, vol. 114, no. 5, pp. 953–956. In Rus.
32. Hecht-Nielsen R. Neurocomputing: picking the human brain. *IEEE Spectrum*, 1988, March. pp. 36–41.
33. Hecht-Nielsen R. Theory of the backpropagation neural network. *Neural Networks for Human and Machine Perception*. Ed. by H. Wechsler. Vol. 2. Boston, MA, Academic Press, 1992. pp. 65–93.
34. Ivanenko B.P. *Neyrosetevoye imitatsionnoye modelirovanie neftyanykh mestorozhdeniy i gidrogeologicheskikh ob'ektov* [Neural network simulation modeling of oil fields and hydrogeological objects]. Tomsk, Tomsk State University Publ. House, 2014. 186 p.
35. Ivanenko B.P., Klestov S.A., Syryamkin V.I. *Neyrosetevoy prognoz prirodnkh resursov. Na primere realnykh neftyanykh mestorozhdeniy, poligonov zakhroneniya ZhRO, prognoze pavodkovykh vod* [Neural network forecast of natural resources. On the example of real oil fields, LRW disposal sites, flood water forecast]. London, LAP LAMBERT Publ. house, 2019. 190 p.
36. Syryamkin V.I., Shumilov V.N. *Sintez iskustvennogo nositelya intellekta: informatsionno-biologicheskii podkhod* [Synthesis of artificial carrier of intelligence: information-biological approach]. 4<sup>th</sup> ed., revised. Moscow, Berlin, Direct-Media LLC, 2021. 228 p.
37. Syryamkin V.I., Gorbachev S.V., Shikhman M.V. Adaptive fuzzy neural production network with MIMO-structure for the evaluation of technology efficiency. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Tomsk, 22–24 November 2018. Tomsk, Institute of Physics Publ., 2019. pp. 012010. DOI: 10.1088/1757-899X/516/1/012010.
38. Syryamkin V.I., Gorbachev S.V., Shikhman M.V. Adaptive neuro-fuzzy classifier for evaluating the technology effectiveness based on the modified Wang and Mendel fuzzy neural production MIMO-network. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Tomsk, 22–24 November 2018. Tomsk, Institute of Physics Publ., 2019. pp. 012037. DOI: 10.1088/1757-899X/516/1/012037.
39. Gorbachev S.V., Syryamkin V.I., Abramova T.V. Synthesis method for a neuro-fuzzy classifier based on a decision tree. *Telecommunications*, 2018, no. 9, pp. 2–7. In Rus.
40. Syryamkin V.I., Suntsov S.B., Titov V.S. Intellektualnye raspredelennyye sistemy raspoznavaniya obrazov v kompleksakh monitoringa, prognoza, diagnostiki, upravleniya i obespecheniya bezopasnosti [Intelligent distributed systems of pattern recognition in complexes of monitoring, forecasting, diagnostics, control and security]. *Optiko-elektronnye pribory i ustroystva v sistemakh raspoznavaniya obrazov, obrabotki izobrazheniy i simvolnoy informatsii. Raspoznavanie-2017. Sbornik materialov XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Optoelectronic devices and devices in systems for pattern recognition, image processing and symbolic information. Recognition-2017. Collection of materials of the XIII International Scientific and Technical Conference]. Kursk, May 16–19, 2017. Kursk, Southwestern State University, 2017. pp. 336–341.
41. Rogerson D. *Osnovy SOM* [Fundamentals of COM]. Translated from English. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Russian edition Publ. and trading house, 2000. 400 p.
42. Troelsen E. *Model SOM i primenenie ATL 3.0* [Model COM and application of ATL 3.0]. Translated from English. St. Petersburg, BHV–St. Petersburg, 2000. 928 p.
43. Gorban A.N. Bystroe differentsirovanie, dvoystvennost i obratnoye rasprostraneniye oshibki [Fast differentiation, duality, and error backpropagation]. *Neyroinformatika* [Neuroinformatics]. Novosibirsk, Nauka, Siberian Publishing Company of the Russian Academy of Sciences, 1998. 337 p.

Received: 24 September 2022.

Reviewed: 8 January 2023.

**Information about the authors**

**Vladimir I. Syryamkin**, Dr. Sc., professor, Honored Inventor of the Russian Federation, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Laureate of the Government of the Russian Federation in the field of education, head of the Department of Quality Management, National Research Tomsk State University.

**Boris P. Ivanenko**, Cand. Sc., senior researcher, National Research Tomsk State University.

**Semen A. Klestov**, assistant, National Research Tomsk State University.

**Maria D. Khilchuk**, engineer, National Research Tomsk State University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*  
Корректура 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 29.05.2023. Дата выхода журнала: 31.05.2023.  
Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 25,24. Уч.-изд. л. 22,83.  
Заказ 180-23. Тираж 500 экз. Цена свободная.



# Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Адрес учредителя, редакции, издателя, типографии:  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, каб. 139.