

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал
Северо-Кавказского федерального
университета

ISSN 2308–4758
DOI: 10.37493/2308-4758.0



Выпуск № 1, 2025 г.

Выходит 4 раза в год

	«Наука. Инновации. Технологии» (Nauka. Innovatsii. Tekhnologii) Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета
Журнал	«Наука. Инновации. Технологии» – рецензируемый научный журнал открытого доступа, публикующий работы по направлениям исследований «Науки о Земле».
Цель журнала:	обобщение фундаментальных и прикладных научных и практических достижений в области наук о Земле. Научная концепция издания предполагает публикацию современных достижений в виде оригинальных статей. В журнале приветствуются публикации по профилю научных школ и направлений, сложившихся на факультетах международных отношений (география ландшафтов, трансформация воспроизводства, расселения и образа жизни населения, в т. ч. на основе геоинформационного мониторинга), нефтегазовой инженерии, физико-технического, медико-биологического. В журнале публикуются рецензии на научные исследования, научно-популярные статьи о территориях, где были проведены экспедиционные исследования, а также отчетные статьи о конференциях и о юбилеях ученых. К публикации в журнале приглашаются отечественные и зарубежные ученые, работающие в области наук о Земле. Журнал публикует статьи на русском и английском языках.
Разделы журнала:	технические науки (геология, поиски, разведка нефтяных и газовых месторождений; технология бурения и освоения скважин; разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений); географические науки (физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов; экономическая, социальная, политическая и рекреационная география; геоинформатика, картография; геоэкология); физико-математические науки (науки об атмосфере и климате).
ISSN DOI	2308–4758 https://doi.org/10.37493/2308-4758.0
Журнал	зарегистрирован в Роскомнадзоре (ПИ № ФС77–52723 от 8.02.2013).
Выходит Дата выхода Дата выхода	4 раза в год. первого номера: 25.02.2013. текущего номера: 31.03.2025.
Сведения о переименовании:	журнал «Наука. Инновации. Технологии» образован в 2012 году в результате перерегистрации журнала «Вестник Ставропольского государственного университета» в связи с переименованием учредителя.
Тираж	1000 экз.
Индекс	94011 «Объединённый каталог. ПРЕССА РОССИИ. Газеты и журналы». Включен в БД «Российский индекс научного цитирования», перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.
Учредитель	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».
Адрес редакции и издателя:	355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1. Телефон: (8652) 33-07-32; E-mail: nit_ncfu@mail.ru ; сайт: https://scienceit.elpub.ru/jour
Адрес издательства	Научной библиотеки ФГАОУ ВО «СКФУ»: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1.
Адрес типографии:	типография ФГАОУ ВО «СКФУ», 355029, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2.
	Материалы журнала открытого доступа в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License, которая разрешает их использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии правильного цитирования оригинальной работы.
Авторское право	на оригинал-макет и оформление принадлежит журналу, авторское право на статьи – авторам.

	«Наука. Инновации. Технологии» (Nauka. Innovatsii. Tekhnologii) Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета
Главный редактор:	Белозеров В. С., д-р геогр. наук, профессор (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия)
Заместитель главного редактора:	Щитова Н. А., д-р геогр. наук, профессор (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия)
Редакционный совет:	Абшаев М. Т., д-р физ.-мат. наук, профессор (Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия); Воробьева О. Д., д-р экон. наук, профессор (Московский государственный университет, г. Москва, Россия); Гасумов В. А., д-р техн. наук, профессор (Азербайджанский технический университет, г. Баку, Россия); Герасименко Т. И., д-р геогр. наук, профессор, стар. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва, Россия); Диневич Л. А., д-р физ.-мат. наук, профессор (Тель-Авивский университет, г. Тель-Авив, Израиль); Жакин А. И., д-р физ.-мат. наук, профессор (Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия); Зырянов А. И., д-р геогр. наук, профессор (Пермский государственный университет, г. Пермь, Россия); Ибрагимов А. И., д-р геогр. наук, профессор (Эгейский университет, Турция, г. Измир, Турция); Коляда А. А., д-р физ.-мат. наук, доцент (Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь); Лиховид А. А., д-р геогр. наук, профессор (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия); Молодикова И. Н., канд. геогр. наук, директор программы (Центрально-Европейский университет, г. Вена, Австрия); Нефедова Т. Г., д-р геогр. наук, вед. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва, Россия); Панин А. Н., канд. геогр. н., доц. (Московский государственный университет, г. Москва, Россия); Рязанцев С. В., член-корреспондент РАН, д. экон. наук, профессор (Институт социально-политических исследований РАН, г. Москва, Россия); Тикунов В. С., д-р геогр. наук, профессор (Московский государственный университет, г. Москва, Россия); Хани А. А. К., канд. техн. наук, профессор (Иорданский университет науки и технологии, г. Ирбид, Иордания)
Редакционная коллегия:	Бадов А. Д., д-р геогр. наук, профессор (Северо-Кавказский федеральный университет (СКФУ), г. Ставрополь, Россия); Бекетов С. Б., д-р техн. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Белозеров В. С., д-р геогр. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Беляев Н. Г., д-р биол. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Гасумов Р. А., д-р техн. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Губарева Л. И., д-р биол. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Джандарова Т. И., д-р биол. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Диканский Ю. И., д-р физ.-мат. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Ерин К. В., д-р физ.-мат. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Закинян А. Р., д-р физ.-мат. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Закинян Р. Г., д-р физ.-мат. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Керимов А. Г., д-р техн. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Котти Б. К., д-р биол. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Лукьянов В. Т., д-р техн. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Лысенко А. В., д-р геогр. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Мишвелов Е. Г., д-р биол. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Полян П. М., д-р геогр. наук, вед. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва, Россия); Разумов В. В., д-р геогр. наук, профессор (Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия); Соловьев И. А., канд. геогр. н., доцент (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Тимченко Л. Д., д-р ветеринар. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Толпаев В. А., д-р физ.-мат. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Федорова Н. Г., д-р техн. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Харченко В. М., д-р геол.-минерал. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Шальнев В. А., д-р геогр. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Щитова Н. А., д-р геогр. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия)
Ученый секретарь:	Соловьев И. А., канд. геогр. наук, доцент (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия)
Переводчик-редактор:	Марченко Т. В., кандидат филологических наук, доцент (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия).
	© ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», оригинал-макет, оформление, 2025

Ministry of Science and Higher Education
of the Russian Federation

SCIENCE. INNOVATIONS. TECHNOLOGIES

Scientific journal
of North-Caucasus Federal
University

ISSN 2308–4758
DOI: 10.37493/2308-4758.0



No. 1, 2025

Published quarterly

	“Science. Innovations. Technologies” Scientific journal of North-Caucasus Federal University
Journal	“Science. Innovations. Technologies” is an open access peer-reviewed journal that publishes the results of scientific research in Earth sciences.
The aim of the journal	is to generalize fundamental and applied scientific and practical advancements in Earth sciences. The policy of the journal provides for the publication of scientific achievements in the form of original articles. The journal focuses on original contributions covering the topics relevant for scientific schools and areas of research formed at international relations (landscape geography, transformation of reproduction, settlement and lifestyle of the population, including the studies based on geoinformation monitoring), oil and gas engineering, physical and technical, and medical and biological faculties. The journal publishes reviews of scientific research, popular science articles about the territories where expeditionary research was carried out, as well as reporting articles about conferences and anniversaries of scientists. The journal welcomes submissions from national and foreign scientists working in the field of geosciences. The journal publishes articles in Russian and English.
Section policies:	technical sciences (geology, prospecting, exploration of oil and gas fields, technologies of drilling and development of wells, development and operation of oil and gas fields); geographical sciences (physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; economic, social, political and recreational geography, geoinformatics, cartography and geoecology); physical and mathematical sciences (atmospheric and climate sciences).
ISSN The journal is	2308–4758. https://doi.org/10.37493/2308-4758.0 the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology registered by and Mass Media (Roskomnadzor) (Certificate on Registration PI No. FS77–52723 of February 8, 2013).
Published quarterly Publication date Publication date Information on renaming:	of the first issue: 02.25.2013. of the current issue: 03.31.2025 the journal “Science. Innovations. Technologies” was established in 2012 following the re-registration of the journal “Bulletin of the Stavropol State University” due to renaming of the founder.
Circulation: Subscription index	1000 copies. in “Unified catalog. PRESS OF RUSSIA. Newspapers and magazines”: 94011. The journal is included into the Russian Science Citation Index database, the list of the leading reviewed scientific journals recommended by the Higher Attestation Commission under the Ministry of Education and Science of the Russian Federation for publication of the main results of dissertations for the degree of candidate and doctor of sciences.
Founder	Federal State Autonomous Educational Institution for Higher Education “North-Caucasus Federal University”.
The address	of the editorial office and the publisher: 1, Pushkin Street, Stavropol, 355017. Telephone: (8652) 33-07-32. E-mail: nit_ncfu@mail.ru; website: https://scienceit.elpub.ru/jour.
The address	of the publishing house of NCFU Scientific Library: 1, Pushkin Street, Stavropol, 355017.
The address	of the printing house: NCFU Publishing Complex, 2, Kulakova Ave., Stavropol, 355029.
The materials	of the journal are open access in accordance with the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License, which permits their use, distribution and reproduction in any medium, provided that the original work is properly cited. The copyright for the original layout and design belongs to the journal; the copyright for the articles belongs to the authors.
	© FSAEI HI “North-Caucasus Federal University”, original layout, design, 2024

	“Science. Innovations. Technologies” Scientific Journal of North-Caucasus Federal University
Editor-in-Chief:	Vitaliy S. Belozеров, Dr. Sci. (Geogr.), Prof. (North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia).
Deputy Editor-in-Chief:	Natalia A. Shchitova, Dr. Sci. (Geogr.), Prof. (North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia).
Editorial Council:	Magomet T. Abshaev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia); Olga D. Vorobieva, Dr. Sci. (Econ.), Professor (Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia); Vagif A. Gasumov, Dr. Sci. (Tech.), Professor (Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan); Tatiana I. Gerasimenko, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Senior Research Fellow (Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia); Leonid A. Dinevich, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel); Anatoly I. Zhakin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (South-West State University, Kursk, Russia); Alexander I. Zyryanov, Dr. Sci. (Geogr.), Professor (Perm State University, Perm, Russia); Aydin I. Ibragimov, Dr. Sci. (Geogr.), Professor (Aegean University, Izmir, Turkey); Andrey A. Kolyada, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor (Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus); Andrey A. Likhovid, Dr. Sci. (Geogr.), Professor (North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia); Irina N. Molodikova, Cand. Sci. (Geogr.), Director of the program (Central European University, Vienna, Austria); Tatyana G. Nefedova, Dr. Sci. (Geogr.), Leading Scientific Researcher (Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia); Alexander N. Panin, PhD of Geographical Sciences, Associate Professor (Moscow State University, Moscow, Russia); Sergey V. Ryazantsev, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Econ.), Professor (Institute of Social and Political Research of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia); Vladimir S. Tikunov, Dr. Sci. (Geogr.), Professor (Moscow State University, Moscow, Russia); Abu A. K. Hani, Cand. Sci. (Tech.), Professor (Jordan University of Science and Technology, Irbid, Jordan).
Editorial Board:	Alexander D. Badov, Dr. Sci. (Geogr.), Professor (North-Caucasus Federal University (NCFU), Stavropol, Russia); Sergey B. Beketov, Dr. Sci. (Tech.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Vitaliy S. Belozеров, Dr. Sci. (Geogr.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Nikolay G. Belyaev, Dr. Sci. (Biol.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Ramiz A. Gasumov, Dr. Sci. (Tech.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Lubov I. Gubareva, Dr. Sci. (Biol.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Tamara I. Dzhandarova, Dr. Sci. (Biol.), Associate Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Yuri I. Dikansky, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Constantine V. Yerin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Arthur R. Zakinyan, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Robert G. Zakinyan, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Abdul G. Kerimov, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Boris K. Kotti, Dr. Sci. (Biol.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Vladimir T. Lukyanov, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Alexey V. Lysenko, Dr. Sci. (Geogr.), Associate Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Evgeny G. Mishvelov, Dr. Sci. (Biol.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Pavel M. Polyan, Dr. Sci. (Geogr.), Leading Scientific Researcher (Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia); Victor V. Razumov, Dr. Sci. (Geogr.), Professor (High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia); Ivan A. Soloviev, PhD in Geographical Sciences, Associate Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Lyudmila D. Timchenko, Dr. Sci. (Veterin.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Vladimir A. Tolpaev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Natalia Fedorova, Dr. Sci. (Tech.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Vladimir M. Kharchenko, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Viktor A. Shalnev, Dr. Sci. (Geogr.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Natalia A. Shchitova, Dr. Sci. (Geogr.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia).
Executive secretary:	Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor Ivan A. Soloviev (North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia)
Translator-editor	Cand. Sci. (Philol.), Associate Professor, Associate Professor Tatiana V. Marchenko (North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 1, 2025

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

1.6.13.	ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ (ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ НАУКИ)	
	Т. А. Балина, З. П. Замаева, К. С. Осоргин	
	Социальная активность насе- ления: пространственный анализ (на примере Приволжского федерального округа)	11
	T. A. Balina, Z. P. Zamaraeva, K. S. Osorgin	
	Social activity of the population: spatial analysis (by the example of the Volga fe- deral district)	12
1.6.18.	НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ (ФИЗИКО- МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ)	
	Б. А. Ашабоков, А. А. Ташилова, Л. А. Кешева, Н. В. Теунова	
	Реализация нейросетевой моде- ли в среде Statistica 12 для прогноза частоты схода селей	37

B. A. Ashabokov, A. A. Tashilova, L. A. Kesheva, N. V. Teunova Implementation of a neural network model in the Statistica 12 for mudflow frequency forecasting	38
--	----

Б. М. Хучунаев, С. О. Геккиева, А. Х. Будаев Исследование воздействия тем- пературы возгонки металлов на их льдообра- зующие свойства в условиях высокой относи- тельной влажности	65
---	----

B. M. Khuchunaev, S. O. Gekkieva, Alim Kh. Budaev The study of the effect of sublimation temperature of metals on their ice-forming proper- ties under high relative humidity conditions	66
--	----

1.6.21. ГЕОЭКОЛОГИЯ (ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ НАУКИ)

В. В. Разумов, Н. Д. Богданова, Н. В. Разумова, Н. В. Кондратьева Оценка степени деформации участков автомобильной дороги Чикола – Ма- цута, пересекающих крупные оползневые мас- сивы (Ирафский район, Республика Северная Осетия – Алания)	89
--	----

V. V. Razumov, N. D. Bogdanova, N. V. Razumova, N. V. Kondratyeva Assessment of the degree of defor- mation of sections of the Chikola – Matsuta high- way crossing large landslide arrays (Irafsky dis- trict, Republic of North Ossetia – Alania)	90
--	----

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

- 2.8.4. РАЗРАБОТКА
И ЭКСПЛУАТАЦИЯ
НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
- Л. Т. Абдразакова,
А. Я. Гильманов,
А. П. Шевелёв**
Методика расчета фазового по-
ведения природной углеводородной системы
с учетом минерализации пластовой воды 117
- L. T. Abdrazakova,
A. Ya. Gilmanov,
A. P. Shevelev**
Methodology for calculation of
phase behavior of a natural hydrocarbon system
with account of formation water mineralization 118
- Б. Х. Беков, О. А. Хужаев**
Эффективность внедрения тех-
нологии E-KON в процесс проектирования и
разработки газоконденсатного месторождения
Шуртан 137
- B. Kh. Bekov, O. A. Khujaev**
The efficiency of E-KON system in
the design and development process of the Shur-
tan gas condensate field. 138
- Р. А. Гасумов,
Э. Р. Гасумов**
О выборе водоносного горизонта
в качестве поглощающего пласта-коллектора
для захоронения промышленных стоков 149

R. A. Gasumov,
E. R. Gasumov

On the selection of an aquifer as
an absorbing reservoir for the disposal of industrial
wastewater 150

Д. А. Иванов

Особенности добычи нефти из
нефтематеринских пород 177

D. A. Ivanov

Some features of source rock oil
production 178



Научная статья
УДК 910.1
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.1>

СОЦИАЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ: ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ (на примере Приволжского федерального округа)

Татьяна Анатольевна Балина^{1*},
Зинаида Петровна Замараева²,
Константин Сергеевич Осоргин³

^{1, 2, 3} Пермский государственный национальный исследовательский университет (д. 15, ул. Букирева, Пермь, 614990, Российская Федерация)

¹ t_balina@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2673-0119>

² zinaidazamaraeva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3070-723X>

³ kosorgin@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9006-4352>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Объектом исследования является социальное благополучие, предметом – социальная активность и самоорганизация населения, которые проявляются в различных аспектах, имеют яркие территориальные различия и требуют пространственных подходов изучения. Актуальность географического исследования благополучия, социальной активности и самоорганизации населения обусловлена тем, что их количественное и качественное представление является информационно-аналитической основой формирования государственной и региональной политики. Одной из форм территориальной самоорганизации населения и проявления социальной активности выступают различные некоммерческие организации, деятельность которых направлена на повышение качества жизни населения и его социального благополучия. Теоретико-методологическим фундаментом исследования является учение о территориальной общности людей (ТОЛ), которая выступает концептуальной моделью для изучения общественных явлений и процессов. Являясь относительно самостоятельной ячейкой территориальной структуры общества, ТОЛ формируется в границах определенных регионов (субъектов) и включает конкретную группу населения со всеми ее характеристиками, что определяет особенности поведения, менталитета, традиций, социальной активности. Исследование построено на анализе показателей грантовой активности организаций по субъектам Приволжского федерального округа, представленных на официальном сайте Фонда Президентских гран-

тов. Выявлены территориальные особенности общественных инициатив, их направленность и проблематика. Среди приоритетных направлений заявок на гранты являются защита прав и свобод человека, благополучие граждан, пропаганда здорового образа жизни, охрана окружающей среды, поддержка молодежных проектов и ряд других. По итогам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что проблемы повышения социального благополучия частично решаются местными сообществами посредством деятельности НКО и их грантовой активности.

Ключевые слова: социальная активность, социальное благополучие, некоммерческие организации, гранты, самоорганизация населения, регионы, Приволжский федеральный округ

Для цитирования: Балина Т. А. Замараева З. П., Осоргин К. С. Социальная активность населения: пространственный анализ (на примере Приволжского федерального округа) // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 1. С. 11–36. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.1>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.01.2025;
одобрена после рецензирования 11.03.2025;
принята к публикации 21.03.2025.

**1.6.11. Geology, Prospecting and Exploration of Oil and Gas Fields
(Geological and Mineralogical Sciences)**
Research article

**Social activity of the population:
spatial analysis
(by the example of the Volga federal district)**

**Tatyana A. Balina^{1*},
Zinaida P. Zamaraeva²,
Konstantin S. Osorgin³**

^{1, 2, 3} Perm State University (15, Bukireva St., Perm, 614990, Russian Federation)

¹ t_balina@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2673-0119>

² zinaidazamaraeva@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3070-723X>

³ kosorgin@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9006-4352>

* Corresponding author

Abstract.

The object of the study is social well-being, the subject is social activity and self-organization of the population, which are manifested in various aspects, have clear territorial differences and require spatial approaches to study. The relevance of the geographical study of well-being, social activity and self-organization of the population is due to the fact that their quantitative and qualitative representation is an information and analytical basis for the formation of state and regional policies. One of the forms of territorial self-organization of the population and manifestation of social activity are various non-profit organizations whose activities are aimed at improving the quality of life of the population and its social well-being. The theoretical and methodological foundation of the study is the doctrine of the Territorial Community of People (TCP), which acts as a conceptual model for the study of social phenomena and processes. Being a relatively independent cell of the territorial structure of society, TCP is formed within the boundaries of certain regions (subjects) and includes a specific group of the population with all its characteristics, which determines the features of behavior, mentality, traditions, social activity. The study is based on the analysis of grant activity indicators of organizations in the subjects of the Volga Federal District, presented on the official website of the Presidential Grants Fund. Territorial features of public initiatives, their focus and problems are identified. Among the priority areas of grant applications are the protection of human rights and freedoms, the well-being of citizens, the promotion of a healthy lifestyle, environmental protection, support for youth projects and a number of others. Based on the results of the study, it can be concluded that the problems of improving social well-being are partially solved by local communities through the activities of NPOs and their grant activity.

Keywords:

social activity, social welfare, non-profit organizations, grants, self-organization of the population, regions, Volga Federal District

For citation:

Balina TA, Zamaraeva ZP, Osorgin KS. Social activity of the population: spatial analysis (by the example of the Volga Federal District). Science. Innovations. Technologies. 2025;(1):11-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.1>

Conflict of interest:

the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 12.01.2025;
approved after reviewing 11.03.2025;
accepted for publication 21.03.2025.

Введение

Современная социально-экономическая география, максимально расширяя свои объект и предмет познания благодаря трансформации в общественную географию, затрагивает самые разнообразные аспекты общественного развития, выявляет их пространственные особенности. Одним из приоритетных направлений общественной географии сегодня является исследование территориальных особенностей жизни людей, что является важным условием для обоснования государственной и региональной социальной политики. Особую значимость приобретает изучение интегральной и очень сложной категории «социальное благополучие», которое, с одной стороны, формируется благодаря совокупности экономических, социальных, демографических, национально-конфессиональных факторов, с другой стороны, определяет жизнь социума, его потребности, традиции, менталитет и другие качества. В данном исследовании среди важнейших атрибутов социального благополучия выступает самоорганизация населения, которая может проявляться в различных формах, в том числе и в деятельности некоммерческих организаций, их активности, участии в жизни социума, вовлеченности в решение актуальных вопросов общественного характера. Участие в жизни общества и желание преобразовать среду обитания во многом зависит от степени социальной активности населения. Активность – это не абстрактная социально-психологическая категория, но ресурс развития региона, способный как ускорять, так и тормозить общественные процессы. Специфика географического подхода предполагает, что при исследовании активности внимание фокусируется не на отдельной личности или социальной группе (как это принято в социологических или психологических исследованиях), а охватывает территориальные общности, формирующиеся в определенных географических (территориальных) условиях [1].

Географический анализ уровня и качества жизни населения имеет весьма глубоко проработанный инструментарий, представленный как в многочисленных научных исследованиях, так и в практике территориального управления. Но более сложные категории – «образ жизни», «социальное благополучие», «социальная ак-

тивность» и др. – находятся на стадии разработки и обсуждения. И если показатели материального благосостояния населения довольно хорошо поддаются формализации пространственного анализа, то оценить социальную активность представляется сложной задачей. В данном исследовании представлена попытка раскрыть ее территориальные особенности через призму самоорганизации местных сообществ, в частности – степени вовлеченности в деятельность некоммерческих организаций, в том числе, участия в подаче заявок на Президентские гранты.

Материалы и методы исследований

Пермская географическая школа, накопив богатый опыт социально-географических исследований, придерживается научных традиций, заложенных М.Д. Шарыгиным, который разрабатывал теоретико-методологический фундамент учений о *Территориальной общественной системе (ТОС)* и *Территориальной общности людей (ТОЛ)*. Эти категории выступают концептуальными моделями для изучения общественного развития, что позволяет рассматривать разноплановые явления и процессы, происходящие в рамках определенных регионов. Как подчеркивал М.Д. Шарыгин, «ТОС, как базисный предмет познания общественной географии, является синтезированным пространственным образованием, в котором зарождаются и реализуются основные ролевые функции и потребности людей. Она обладает синергетическими свойствами и новыми характеристиками по отношению к входящим в ее состав демографическим, социальным, природным, экономическим, культурным, духовным, политическим и другим компонентам» [2, с. 231].

Ядром ТОС является территориальная общность людей, представляющая собой относительно самостоятельную ячейку территориальной структуры общества, которая включает конкретную группу населения со всеми ее характеристиками, определяющими особенности поведения, менталитета, традиций, культурной среды, социального самочувствия [3].

Каждая территориальная общность наделена своими характеристиками, которые определяются образом жизни. Н. А. Щитова от-

мечает, что образ жизни – это сложная своеобразная система жизнедеятельности, сложившаяся в конкретных культурно-исторических и географических условиях, отражающая накопленный опыт, ценности и формы отношения к миру, характерные для определенного человеческого сообщества, в рамках которого происходит формирование множества разнообразных способов и стилей жизни [4]. Соглашаясь с мнением автора, подчеркнем, что в современной общественной географии нет «утвержденного» сценария оценки образа жизни и социального благополучия с набором конкретных показателей, отражающих общие и уникальные черты социума. Исследователи предлагают оригинальные методики, алгоритмы исследований, наборы показателей и критериев, а также приемов анализа и интерпретации результатов [5, 6, 7]. Так, например, индикаторами социального благополучия могут выступать показатели бедности населения [8], социального сиротства [9], индекс человеческого развития [10] и др.

Интерес вызывает трактовка Т. Рата и Дж. Хартера, которые выделили пять элементов благополучия: профессиональное, физическое (здоровье), социальное, финансовое и благополучие в среде проживания, в том числе безопасность и собственный вклад в развитие общества [11]. Эта формулировка созвучна с гипотезой данного исследования, нацеливая на изучение социальной активности и желания людей преобразования окружающей действительности.

Результаты исследований и их обсуждение

Местные сообщества или ТОЛ, формирующиеся в границах конкретной территории, отличаются разной степенью социальной активности, что проявляется в их стремлении улучшить среду жизнеобитания, решить проблемы собственными силами, создав группы единомышленников, принять участие в общественной деятельности. Принадлежность людей к определенной территории является необходимым условием консолидации их в местное сообщество. Совместное проживание настраивает людей на поиск возможностей по улучшению условий жизни, повышению качества окружающей среды. Личные инициативы, умение самоорганизации и координации собственных усилий являются на сегодняшний день

крайне важными качествами, которые выгодно отличают представителей местных сообществ.

Отечественные социологи уже более полувека назад глубоко и всесторонне рассматривали сущность категории «социальная активность», выявляя ее содержание, сходство и отличие от понятия «социальная деятельность». Чаше социальная активность определяется как сознательная целенаправленная деятельность, ориентированная на преобразование объективных социальных условий, формирование активной жизненной позиции; это характеристика деятельности, отражающая реализации социальных возможностей человека (его способностей, знаний, умений, навыков, стремлений, целей, задач) [12].

В.А. Смирнов отмечает, что социальная активность является мерой социальной деятельности – мерой в философском смысле, а не просто количественной характеристикой интенсивности этой деятельности, выражает ее конкретно-историческую обусловленность. Ее целью является реализация интересов общества, классов, тех или иных социальных общностей, личности как члена данного сообщества [13]. С этим высказыванием согласны не все специалисты, утверждая, что мера деятельности – это количественная и функциональная характеристика. Мер существует много (производительность, показатели затраченного времени, ее результаты и т.д.), а активность как мера является далеко не самой эффективной, поскольку активность – это социально-психологическое состояние субъекта. С этих позиций активность вообще не может быть мерой деятельности [14].

Л.Н. Коган предложил серьезное дополнение к этой дискуссии. Он считает, что вопрос о природе социальной активности может быть научно решен лишь в том случае, если она рассматривается как результат тех или иных общественных сил. У социальной активности есть одно отличие от социальной деятельности: первая представляет общественное качество людей. Одной из ее характеристик является отношение к социальной среде (ситуации), которое не всегда выражается в действии. Уже само проявление интереса к общественным проблемам (в противовес равнодушию) свидетельствует о наличии социальной активности [15]. Другими словами,

социальную активность в большей степени характеризует желание принять участие в практическом решении общественно значимых проблем, например, в деятельности местного самоуправления, участии общественных движениях, членство в партиях или в деятельности некоммерческих организаций.

В.Н. Константинов предложил выделять несколько уровней социальной активности, которые основаны на взаимодействии понятий «социальная активность» и «жизненная позиция», где высокий уровень предполагает социальную инициативу и творческую деятельность, а самый низкий – пассивную жизненную позицию, с потенциально-негативной направленностью, в основе которой лежит скептицизм [16].

Эти утверждения не потеряли своей актуальности, а находят отражение в современных исследованиях. Так, у Ю.Р. Вишневого и его коллег социальная активность раскрывается через оценку инновационного потенциала молодежи. Как указывают авторы, «основным фактором, мотивирующим молодых людей на активность в сфере инновационного бизнеса, выступает социальное настроение оптимизма относительно своих перспектив и возможностей самореализации на фоне более пессимистичных оценок общественной перспективы» [17, с. 15].

Как следует из выше изложенного, в социологии данная тематика вызывает множество споров и представляет интерес не только как предмет научной дискуссии, но и для выявления наиболее значимых вопросов общественного развития. Для общественной географии данные проблемы особенно актуальны применительно к вопросам, организации местного самоуправления [18, 19 и др.], самоорганизации населения [20, 21 и др.] и пр.

В условиях современной цифровизации человек, не ставший членом местного сообщества, часто ищет альтернативу, уходит в виртуальное пространство. В социальных сетях группы людей самоорганизуются не по месту проживания, а по месту в информационном поле. Они могут никогда не встречаться «вживую», но тратят время, финансовые и эмоциональные ресурсы на интеллектуальное взаимодействие [22, 23 и др.]. Многие исследователи отмечают, что современное российское общество демонстрирует новые

принципы структурирования социальной действительности и даже выражают озабоченность тем, что такие некоторые новые социальные практики постепенно захватывают публичное пространство здравого смысла и начинают доминировать в нем, устанавливая свои собственные императивы. В этом отношении возможно говорить не только о предельной креативизации современной социальной, но и об опасности ее подмены креативностью [24]. Уход людей от реальности в виртуальное пространство вызывает тревогу у ученых, поскольку приводит к социальной отчужденности, к автономизации личности, высвобождению человека из системы устойчивых связей и взаимоотношений, что особенно остро стало проявляться благодаря цифровизации [25]. В силу этого особый интерес сегодня представляет идея о «растворении» мест и территорий, поскольку переход из пространства реального в пространство виртуальное стал явлением повседневным и весьма распространенным. Тому подтверждение – многочисленные группы, чаты и обсуждения в социальных сетях, которые занимают большее количество времени многих людей, особенно молодежи. На фоне этого с особой актуальностью встает вопрос о сохранении территориальной целостности и единства социумов, сформировавшихся в границах определенных поселений, регионов. Важную роль в этом процессе могут сыграть НКО, которые объединяют людей не только по месту жительства, но и по интересам, ценностным ориентирам, степени самоорганизации.

Географический анализ социальной активности населения мы провели на основе деятельности НКО в разрезе субъектов Приволжского федерального округа, что, с одной стороны, отражает степень самоорганизации местных сообществ, с другой – позволяет выявить территориальные особенности социального благополучия, понять, каковы потребности, запросы и проблемы населения. Подобного рода исследования позволяют обосновать и реализовать социальную политику на региональном и локальном уровнях.

Принадлежность людей к определенной территории является необходимым условием консолидации их в местное сообщество. Совместное проживание принуждает людей к поиску оптимальных условий жизнедеятельности, улучшению качества окружающей их

среды. Личные инициативы, умение самоорганизации и координации собственных усилий являются на сегодняшний день крайне важными качествами, которые выгодно отличают представителей местных сообществ.

Одним из способов выражения социальной активности является самоорганизация населения, его стремление принять участие в общественной жизни, реализовать свой творческий потенциал, найти единомышленников. Поэтому участие в НКО, отражающая социальную активность, – это форма проявления самоорганизации населения, которое направлено на создание комфортных условий жизни и повышение социального благополучия местного сообщества. Оценить и «измерить» эту категорию нам представляется возможным на основе показателей количества НКО и направленности их деятельности, численности их участников, числа заявок на гранты и полученных из фонда средств. Поддержка некоммерческих организаций местного уровня особенно важна для сельских территорий, где активность «снизу» представляется важнейшим элементом парадигмы развития [26]. Анализ существующих сегодня аналогичных операторов представляется важным направлением в исследованиях общественной географии. В рамках данной статьи рассмотрим наиболее интересные с точки зрения территориальных особенностей результаты.

Фонд Президентских грантов является единым оператором грантов Президента Российской Федерации, который с 2017 г. предоставляет финансирование на инициативные проекты представителей гражданского общества и местных сообществ [27]. Все подаваемые заявки располагаются на официальном сайте Фонда, где каждый может ознакомиться с их содержанием, аннотациями и целью получения, узнать, принята она или отклонена.

Проекты заявок при попадании в Фонд распределяются по грантовым направлениям: защита прав и свобод человека и гражданина, в том числе защита прав заключенных; охрана здоровья граждан, пропаганда здорового образа жизни; охрана окружающей среды и защита животных; поддержка молодежных проектов, реализация которых охватывает виды деятельности, предусмотренные статьей 31.1 Федерального закона от 12 января 1996 г. № 7-ФЗ

«О некоммерческих организациях»; поддержка проектов в области культуры и искусства; поддержка проектов в области науки, образования, просвещения; поддержка семьи, материнства, отцовства и детства; развитие институтов гражданского общества; развитие общественной дипломатии и поддержка соотечественников; сохранение исторической памяти; социальное обслуживание, социальная поддержка и защита граждан; укрепление межнационального и межрелигиозного согласия [28].

Проанализировав данные Фонда Президентских грантов, мы выяснили, что Приволжский федеральный округ – один из лидеров по привлечению некоммерческих организаций в сферу оказания социальных услуг. Различную деятельность в ПФО осуществляет 1 425 негосударственных организаций, что составляет 83,43 % от общего количества НКО в России, а именно 1 708 организаций. Но это не означает, что ровно столько же и оказывает социальные услуги. Реестр поставщиков услуг – это некая сертификация. Федеральный закон № 442-ФЗ дает возможность подать заявку на бюджетное финансирование, в том числе через механизм компенсации [29]. Для того чтобы принять участие, организация должна зайти в реестр, подать о себе сведения, а затем обратиться в территориальные управления Министерства социального развития своего региона. Если те граждане, которым необходимо обслуживание, признаны нуждающимися и организация входит в реестр, то на таких условиях организации может быть компенсирована часть затрат из бюджета субъекта. Наибольшее количество НКО было зарегистрировано в Кировской, Нижегородской и Ульяновской областях (рис. 1). Менее всего некоммерческие организации представлены в Чувашской республике и Республике Мордовия.

Исходя из общего количества заявок, поданных на то или иное направление, можно сделать вывод о насущности и актуальности проблем, которые в наибольшей степени волнуют представителей местных сообществ каждого региона. Проведенный анализ показал, что наиболее востребованным и чаще всего упоминаемым направлением Президентских грантов является «Защита прав и благополучие граждан» (рис. 2). Таковую «популярность» можно объяснить рядом факторов, обуславливающих серьезные социальные проблемы в ПФО.

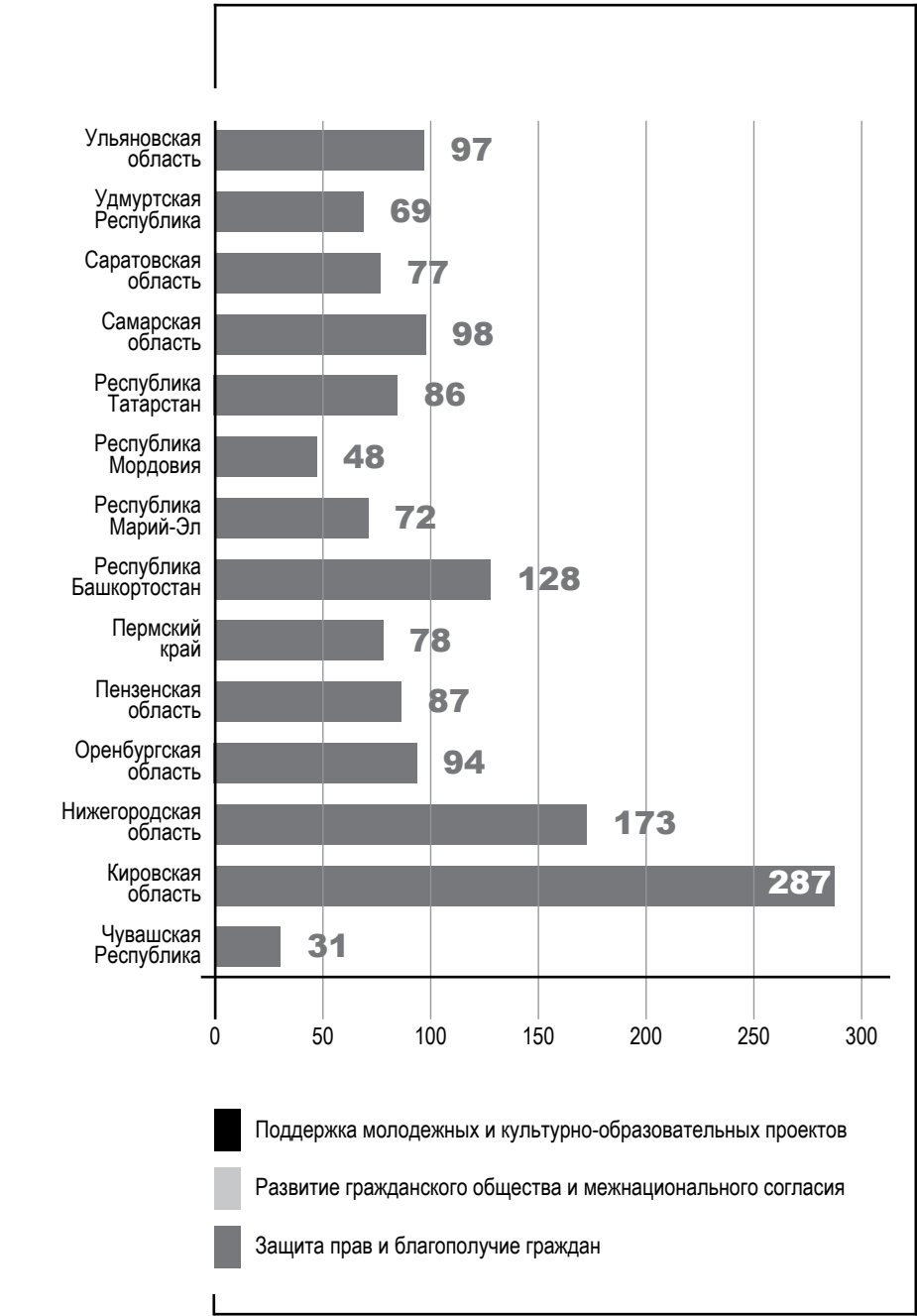


Рис. 1. Количество некоммерческих организаций в регионах Приволжского федерального округа, 2023 г.

Fig. 1. Number of non-profit organizations in the regions of the Volga Federal District, 2023.

Источник:

составлено по данным [27].

Source:

compiled according to data [27].

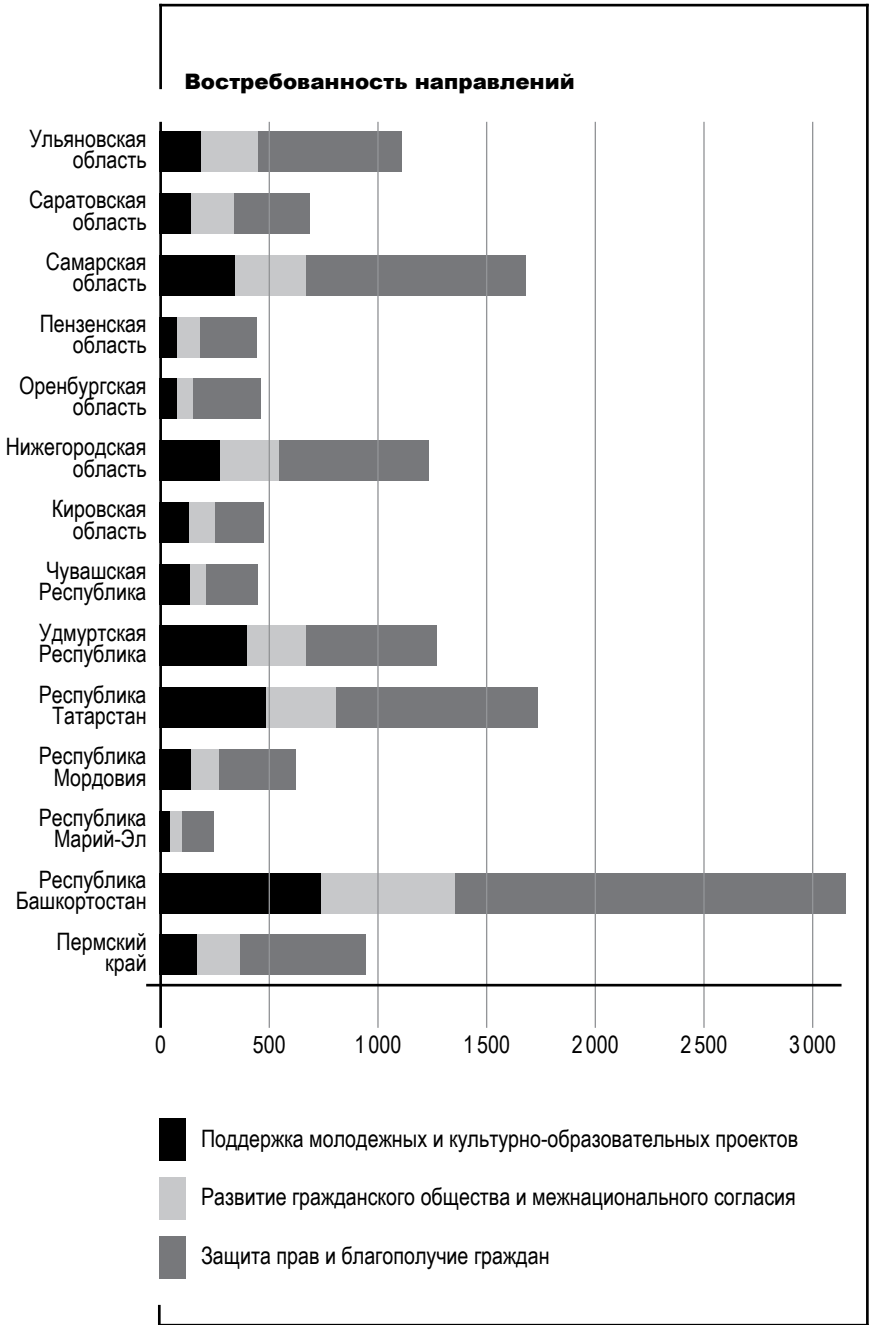


Рис. 2. Востребованность направлений (количество заявок, поданных НКО на Президентские гранты), 2023 г.

Fig. 2. Demand for areas (number of applications submitted by NGOs for Presidential grants), 2023.
Источник: составлено по данным [27].
Source: compiled according to data [27].

Наиболее проблемные направления в 2023 г., заявки на которые преобладают в Приволжском федеральном округе, – это «Охрана здоровья граждан, пропаганда здорового образа жизни» (768 заявок), «Социальное обслуживание, социальная поддержка и защита граждан» (631 заявка) и «Сохранение исторической памяти» (464 заявки). Наименьшее количество заявок было подано по направлениям «Развитие общественной дипломатии и поддержка соотечественников» и «Укрепление межнационального и межрелигиозного согласия» (47 и 91 заявка соответственно).

На карте отражены показатели активности некоммерческих организаций при подаче заявок на гранты Президентского фонда (рис. 3).

Количественным фоном показано число поданных заявок, которое разнится более, чем в 4 раза от минимального в Марий Эл до максимальных показателей в Башкирии, Татарстане и Самарской области. Круговыми диаграммами показаны три основных направления, по которым были получены гранты. Практически во всех субъектах ПФО более половины заявок направлены на защиту прав и благополучие населения.

Анализ и визуализация тематики заявок, включающих краткое описание, цель, задачи и обоснование социальной значимости, были проведены с помощью так называемого «облака тегов» (рис. 4). Наиболее часто встречавшиеся в текстах заявок слова и термины могут указывать на наиболее насущные и проблемные направления.

Данный метод позволит визуализировать наиболее проблемные сферы жизнедеятельности во всех субъектах ПФО. Как показал анализ, большая часть заявок направлена на решение вопросов защиты прав и благополучия населения. Средства, направленные на реализацию этих заявок на гранты, распределились следующим образом (рис. 5).

Безусловным лидером является Татарстан, получивший более 120 млн. рублей в виде грантовой поддержки НКО, за ним следуют Самарская и Саратовская области, получившие более 50 млн. рублей. Замыкают список Пензенская область и Мордовия, которые отличаются низкими показателями социальной активности и уровнем самоорганизации.

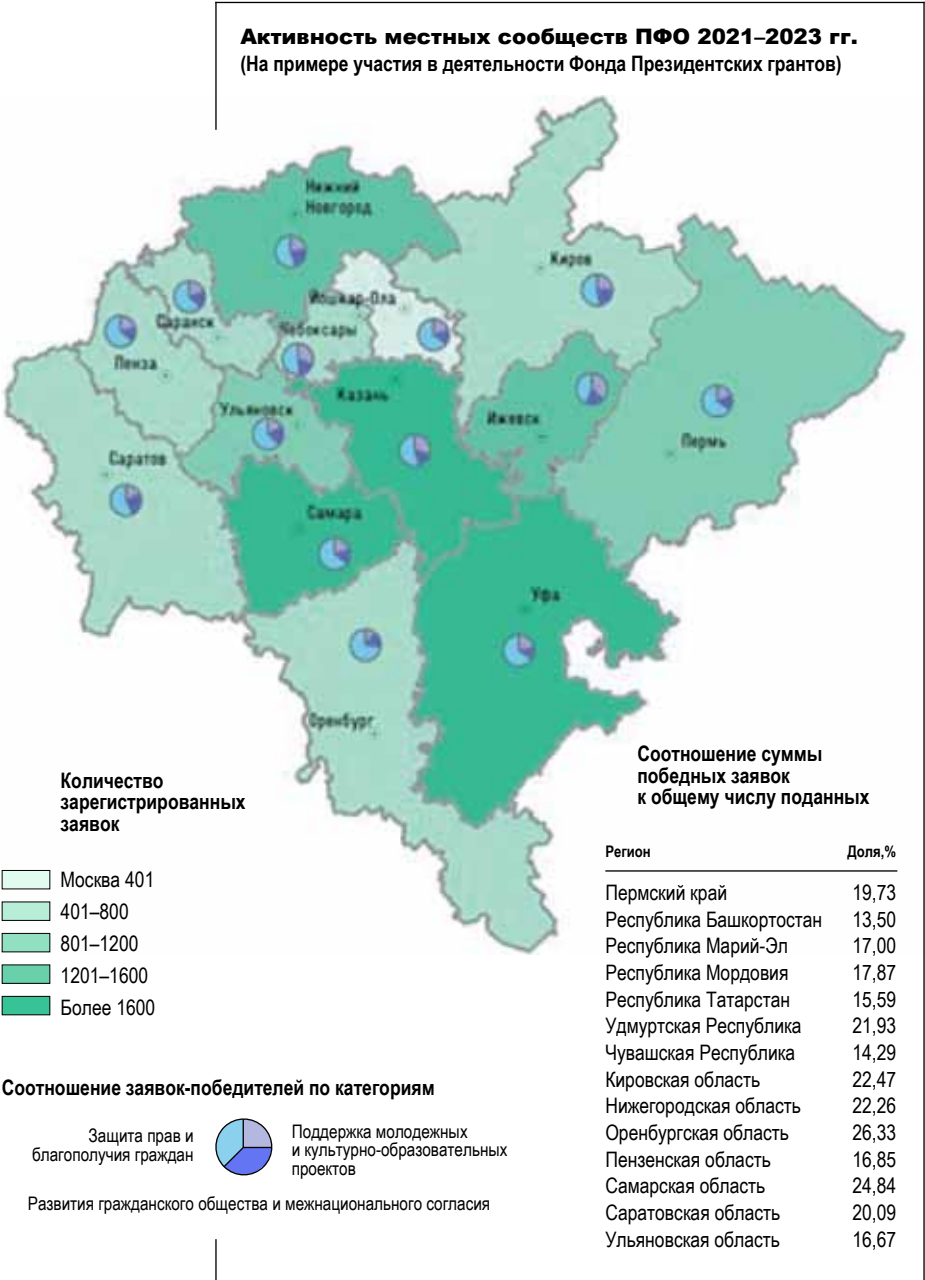


Рис. 3.

Активность местных сообществ Приволжского Федерального округа за 2021–2023 гг. (на примере участия в деятельности Фонда Президентских грантов).

Fig. 3. Activity of local communities of the Volga Federal District for 2021–2023 (based on participation in the activities of the Presidential Grants Fund).

Источник: составлено по данным [27].

Source: compiled according to data [27].

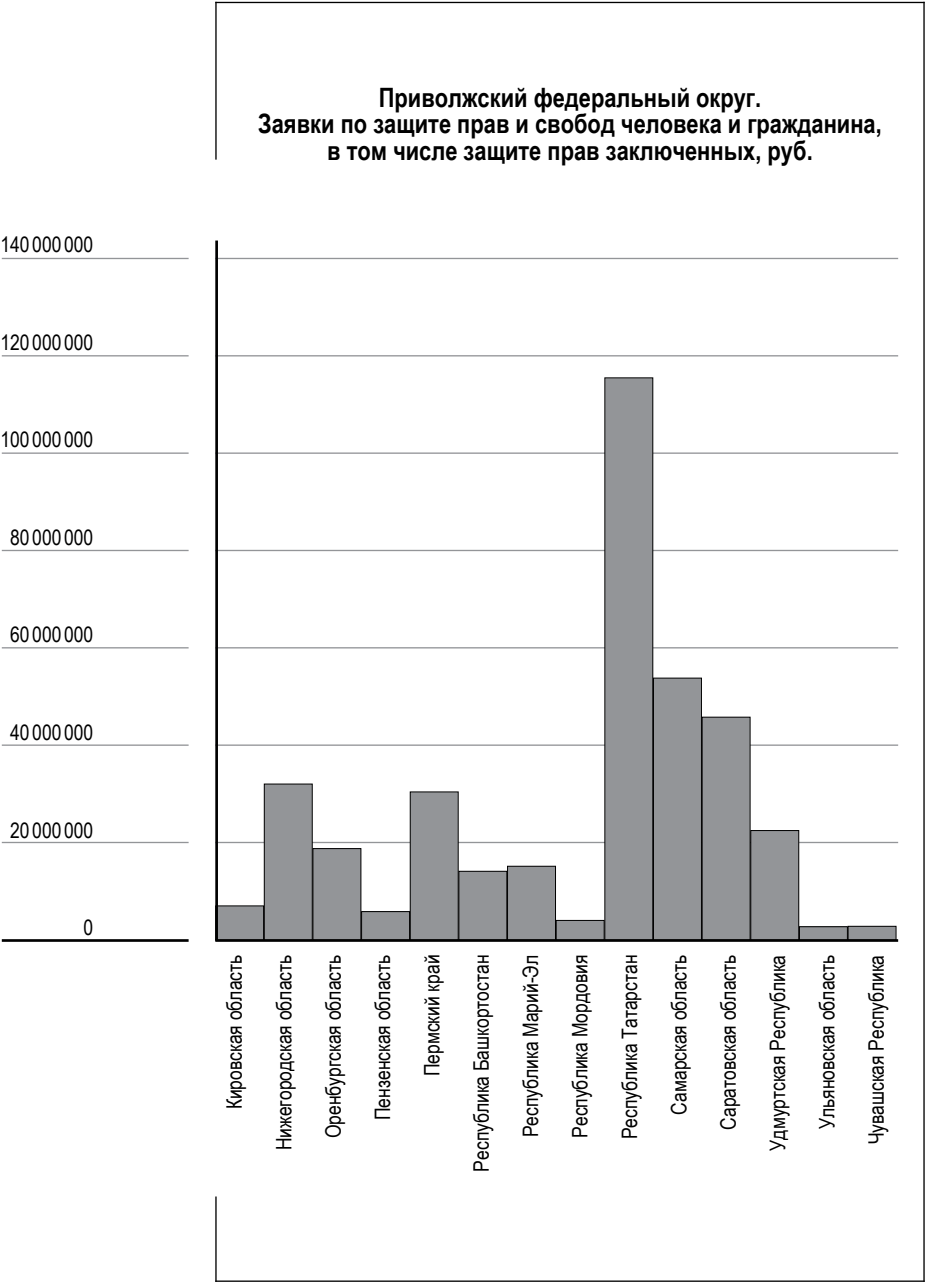


Рис. 5. Распределение заявок на гранты по защите прав человека в субъектах ПФО за 2020–2023 гг.
Fig. 5. Distribution of applications for grants for the protection of human rights in the subjects of the Volga Federal District for 2020-2023.

Источник: составлено по данным [27].
Source: compiled according to data [27].

Заключение

Проведенное исследование позволило выявить территориальные различия в проявлении социальной активности населения, проживающего в границах субъектов ПФО. Проживая на одной территории с ее уникальным природно-ресурсным потенциалом, экономикой, социально-демографическими процессами, территориальные общности людей (местные сообщества) характеризуются различной степенью социальной активности, объединяются в различного рода инициативные группы, некоммерческие и коммерческие объединения.

Совокупность взаимосвязанных эндогенных и экзогенных факторов определяет уровень социальной активности людей, степень их самоорганизации, заинтересованности в улучшении условий жизни, включенности в жизнь местного сообщества. Формой социальной активности и самоорганизации выступила деятельность жителей в НКО, которые создаются для достижения социальных, благотворительных, культурных и других целей, удовлетворения духовных потребностей людей, защиты их прав, а также в иных целях, направленных на повышение социального благополучия. Как показал проведенный анализ, наиболее высокой степенью социальной активности и самоорганизации населения отличаются республики Татарстан и Башкортостан, Самарская и Нижегородская области.

Таким образом, пространственный анализ социальной активности и самоорганизации населения требует глубоких междисциплинарных исследований, проработки понятийного аппарата изучения географического социального благополучия, разработки системы критериев и индикаторов, поскольку представляет собой не только важную теоретико-методологическую работу, но служит инструментом для принятия управленческих решений и обоснования региональной социальной политики. Анализ существующих сегодня аналогичных операторов представляется важным направлением в исследованиях социально-экономической и общественной географии.

Список источников

1. Балина Т. А. Региональная диагностика социальной ситуации (на материалах Пермской области): дис. ... канд. геогр. наук. Пермь: Пермский государственный университет, 1996. 16 с.
2. Шарыгин М. Д. Эволюция учения о территориальных общественных системах // Географический вестник. 2006. № 1 (13). С. 4–13.
3. Балина Т. А., Столбов В. А. Социальное самочувствие населения в контексте поведенческой географии // Географический вестник. 2023. № 1 (64). С. 72–83.
4. Щитова Н. А. География образа жизни: теория и практика регионального исследования: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М.: Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2005. 38 с.
5. Шайдурова Е. С., Субботина Т. В. Теоретико-методологические вопросы изучения социального благополучия населения на примере Пермского края // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2020. Т. 6 (16). № 2. С. 146–157.
6. Ходырев А. Н. Социальное благополучие жителей как сфера компетенции местного самоуправления // Знание. Понимание. Умение. 2014. № 3. С. 166–176.
7. Когай Е. А. Счастье и социальное благополучие в региональном измерении // Актуальные вопросы устойчивого развития современного общества и экономики: сборник научных статей 3-й Всероссийской научно-практической конференции. В 2-х томах. Курск, 2024. С. 206–209.
8. Воронова К. А., Замараева З. П. Категория «бедность» в социологической науке // Теории и проблемы политических исследований. 2018. № 1. Т. 8 С. 174–186.
9. Балина Т. А., Замараева З. П., Игнатьева А. А. Пространственный анализ социального сиротства как индикатора благополучия населения // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2024. Т. 34. № 3. С. 315–325.
10. Киселев С. Н., Солохина Л. В. Индекс человеческого развития и отдельные показатели, характеризующие социальное благополучие населения Дальневосточного федерального округа // Вестник общественного здоровья и

здравоохранения Дальнего Востока России. 2017. № 1 (26). С. 1–15.

11. Пять элементов благополучия: Инструменты повышения качества жизни / Том Рат, Джим Хартер; пер. с англ. М.: Альпина Паблишерз, 2011. 148 с.
12. Осипов Г. В. Социология: словарь-справочник. Т. 1. Социальная структура и социальные процессы. М.: Наука, 1991. 446 с.
13. Смирнов В. А. Социальная активность советских рабочих (некоторые методологические и социологические аспекты проблемы). М., 1979. 207 с.
14. Беленький В. Х. Активность народных масс. Красноярск. Красноярской книжное издательство. 1973. 288 с.
15. Коган Л. Н. Цель и смысл жизни человека, М., 1984. 252 с.
16. Константинов В. Н. Социальная активность и пассивность личности. Владимир: Знание. 1990. 118 с.
17. Дидковская Я. В., Вишневский Ю. Р., Лугин Д. А. Инновационный потенциал молодежи: мотивация участия и барьеры реализации молодежных стартапов // Вестник ПНИПУ. Социально-экономические науки. 2021. № 1. С. 8–20.
18. Столбов В. А., Субботина Т. В. Межмуниципальное взаимодействие в современной России: актуальность, проблемы, поиск решений // Муниципальные образования регионов России: проблемы исследования, развития и управления: Материалы V всероссийской межведомственной научно-практической конференции с международным участием, Воронеж, 10–12 ноября 2022 года. Воронеж: Цифровая полиграфия, 2022. С. 137–142.
19. Кулаковский Е. С. Проблемы организации местного самоуправления в Российской Федерации // Муниципальные образования регионов России: проблемы исследования, развития и управления: Материалы V всероссийской межведомственной научно-практической конференции с международным участием, Воронеж, 10–12 ноября 2022 года. Воронеж: Цифровая полиграфия, 2022. С. 643–648.
20. Шарыгин М. Д., Осоргин К. С. Территориальная основа организации местного сообщества // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Гуманитарные и общественные науки. 2018. № 3. С. 94–104.

21. Сидоркина З. И. Территориальная организация и социальная самоорганизация населения в макрорегионе: Дальний Восток России: автореферат дис. ... докт. геогр. наук. Пермь, 2013. 35 с.
22. Осоргин К. С. Понятия «место» и «местное сообщество»: подходы к интерпретации // Географический вестник. 2018. № 1 (44). С. 83–89.
23. Шупер В. А. Самоорганизация на переломе траектории социально-экономического развития: вызовы для России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. № 1. С. 147–155.
24. Карпиевич В. А. Отражение проблемы социального отчуждения в японских культурных индустриях // Человек в социокультурном измерении. 2023. № 2. С. 19–25.
25. Мацевич-Духан И. Я. Феномен российского креативного пространства // Человек в социокультурном измерении. 2022. № 1. С. 48–56
26. Костяев А. И. К вопросу о парадигме развития сельских территорий // Фундаментальные и прикладные исследования кооперативного сектора экономики. 2018. № 6. С. 3–12.
27. Официальный сайт «Фонда президентских грантов». URL: <https://прездиентскиегранты.рф/public/home/about> (дата обращения 15.01.2025).
28. Федеральный закон от 12.01.1996 N 7-ФЗ (ред. от 30.09.2024) «О некоммерческих организациях» (с изм. и доп., вступ. в силу с 05.02.2025). URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102039064> (дата обращения 10.02.2025).
29. Федеральный закон «Об основах социального обслуживания граждан в Российской Федерации» от 28.12.2013 N 442-ФЗ (последняя редакция). URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102170561> (дата обращения 09.02.2025).

References

1. Balina TA. Regional diagnostics of the social situation (based on the materials of the Perm region): the abstract of the dissertation of cand. geogr. sciences. Perm: Perm State University; 1996. 16 p. (In Russ).
2. Sharygin MD. The evolution of the doctrine of territorial social systems. *Geographical Bulletin*. 2006;1(13):4-13. (In Russ.).
3. Balina TA, Stolbov VA. Social well-being of the population in the context of behavioral geography. *Geographical Bulletin*. 2023;1(64):72-83. (In Russ.).
4. Shchitova NA. Geography of lifestyle: theory and practice of regional research: dissertation of dr. geogr. sciences. Moscow: Moscow State University; 2005. 38 p. (In Russ.).
5. Shaidurova ES, Subbotina TV. Theoretical and methodological issues of studying the social well-being of the population on the example of the Perm Region. = *Geopolitics and eco-geodynamics of regions*. 2020;6(16):146-157. (In Russ.)
6. Khodyrev AN. Social welfare of residents as a sphere of competence of local self-government. *Znanie. Ponimanie. Umenie = Knowledge. Understanding. Ability*. 2014;(3):166-176. (In Russ.)
7. Kogai EA. Happiness and social well-being in the regional dimension. Current issues of sustainable development of modern society and the economy. In *Collection of scientific articles of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference*. In 2 volumes. Kursk; 2024. P 206-209. (In Russ.).
8. Voronova KA, Zamaraeva ZP. The category of "poverty" in sociological science. *Teorii i problemy politicheskikh issledovaniy = Theories and problems of political studies*. 2018;1(8):174-186. (In Russ.).
9. Balina TA, Zamaraeva ZP, Ignatieva AA. Spatial analysis of social orphanhood as an indicator of the well-being of the population. *Vestnik Udmurtskogo Universiteta = Bulletin of Udmurt University. Series Biology. Earth Sciences*. 2024;3(34):315-325. (In Russ.).
10. Kiselev SN, Solokhina LV. Human development index and selected indicators characterizing the social well-being of the population of the Far Eastern Federal District. *Vestnik*

obshchestvennogo zdorov'ya i zdravoohraneniya Dal'nego Vostoka Rossii = Bulletin of Public Health and Public Health of the Russian Far East. 2017;1(26):1-15. (In Russ).

11. The five elements of well-being: Tools for improving the quality of life / Tom Rath, Jim Harter; Translated from English. Moscow: Alpina Publishers; 2011. 148 p. (In Russ.).
12. Osipov GV. Sociology: dictionary and reference book. Vol. 1. Social structure and social processes. Moscow: Nauka; 1991. 446 p. (In Russ.).
13. Smirnov VA. Social activity of Soviet workers (some methodological and sociological aspects of the problem). Moscow: Nauka; 1979. 207 p. (In Russ)
14. Belenky VH. The activity of the masses. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk book publishing house; 1973. 288 p. (In Russ.).
15. Kogan LN. The purpose and meaning of human life. Moscow: Nauka; 1984. 252 p. (In Russ.).
16. Konstantinov VN. Social activity and passivity of personality. Vladimir: Knowledge; 1990. 118 p. (In Russ.).
17. Didkovskaya YaV, Vishnevsky YuR, Lugin DA. The innovative potential of youth: motivation for participation and barriers to the implementation of youth startups. PNRPU Sociology and Economics Bulletin. 2021;(1):8-20. (In Russ.).
18. Stolbov VA, Subbotina TV. Inter-municipal interaction in modern Russia: relevance, problems, search for solutions. In Municipalities of the regions of Russia: problems of research, development and management: Proceedings of the V All-Russian Interdepartmental scientific and practical conference with international participation, Voronezh, November 10-12, 2022. Voronezh: Digital Polygraphy; 2022;137-142. (In Russ.).
19. Kulakovskiy ES. Problems of organizing local self-government in the Russian Federation. In Municipalities of the regions of Russia: problems of research, development and management: Proceedings of the V All-Russian interdepartmental scientific and practical conference with international participation, Voronezh, November 10-12, 2022. Voronezh: Digital Polygraphy; 2022;643-648. (In Russ.).
20. Sharygin MD, Osorgin KS. The territorial basis of the organization of the local community. Vestnik of Immanuel Kant Bal-

tic Federal University. Series: Humanities and social science. 2018;(3):94-104. (In Russ.).

21. Sidorkina ZI. Territorial organization and social self-organization of the population in the macroregion: the Russian Far East: dissertation of dr. of geogr. sciences. Perm; 2013. 35 p. (In Russ.).
22. Osorgin KS. The concepts of “place” and “local community”: approaches to interpretation. Geographical Bulletin. 2018;1(44):83-89. (In Russ.).
23. Shuper VA. Self-organization at a turning point in the trajectory of socio-economic development: challenges for Russia. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 2020;147-155. (In Russ.).
24. Karpievich VA. Reflecting the problem of social alienation in Japanese cultural industries. Human in the socio-cultural dimension. 2023;2:19-25.
25. Macevich-Duhan IYa. The phenomenon of the Russian creative space. Human in the socio-cultural dimension. 2022;1:48-56.
26. Kostyaev AI. On the issue of the paradigm of rural development. Fundamental and applied studies on the economics cooperative sector. 2018;(6):3-12. (In Russ.).
27. The official website of the Presidential Grants Foundation. Available from: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102039064> [Accessed 15 January 2025] (In Russ.).
28. Federal Law No. 7-FZ of 12.01.1996 (as amended on 30.09.2024) “On Non-Profit Organizations” (as amended and supplemented, intro. effective from 02/05/2025). Available from: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102039064> [Accessed 10 February 2025] (In Russ.).
29. Federal Law “On the Basics of Social Services for Citizens in the Russian Federation” dated December 28, 2013 N 442-FZ (latest edition). Available from: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102170561> [Accessed 09 February 2025] (In Russ.).

Информация об авторах

Татьяна Анатольевна Балина – кандидат географических наук, доцент кафедры социально-экономической географии Пермского государственного национального исследовательского университета.

Зинаида Петровна Замараева – доктор социологических наук, профессор, заведующая кафедрой социальной работы и конфликтологии Пермского государственного национального исследовательского университета.

Константин Сергеевич Осоргин – старший преподаватель кафедры социально-экономической географии Пермского государственного национального исследовательского университета.

Вклад авторов

Татьяна Анатольевна Балина. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне и ее окончательного варианта.

Зинаида Петровна Замараева. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за теоретические аспекты работы, целостность всех частей статьи.

Константин Сергеевич Осоргин. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных, выполнение карт и графического материала, участие в научном дизайне статьи и ее окончательном варианте.

Information about the authors

Tatyana A. Balina – Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor of the Department of Social and Economic Geography Geography, Perm State National Research University.

Zinaida P. Zamaraeva – Dr. Sci. (Econ.), Professor, Head of Department of Social Work and Conflictology, Perm State National Research University.

Konstantin S. Osorgin – Senior Lecturer of Department of Social and Economic Geography, Perm State National Research University.

Contribution of the authors

Tatyana A. Balina. Preparation and editing of the text – drafting the manuscript and forming its final version, participation in the scientific design and its final version

Zinaida P. Zamaraeva. Approval of the final version – acceptance of responsibility for the theoretical aspects of the work, the integrity of all parts of the article.

Konstantin S. Osorgin. Conducting the research – collecting, interpreting and analyzing the obtained data, creating maps and graphic material, participating in the scientific design of the article and its final version.



Научная статья
УДК 551.583
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.2>

РЕАЛИЗАЦИЯ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ В СРЕДЕ STATISTICA 12 ДЛЯ ПРОГНОЗА ЧАСТОТЫ СХОДА СЕЛЕЙ

Борис Азреталиевич Ашабоков^{1, 2},
Алла Амарбиевна Ташилова^{3*},
Лара Асировна Кешева⁴,
Наталия Вячеславовна Теунова⁵

- ^{1, 3, 4, 5} Высочайший геофизический институт (д. 2, пр. Ленина, 360001, Нальчик, Российская Федерация)
² Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН (д. 37, ул. Инессы Арманд, Нальчик, 360017, Российская Федерация)

^{1, 2} ashabokov.boris@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2889-0864>

³ tashilovaa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2368-6047>

⁴ kesheva.lara@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5132-1563>

⁵ nata0770@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1135-3587>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

В статье изложены некоторые принципы работы искусственной нейросети, приводится пример реализации нейросетевой модели с помощью подбора ее наилучшей архитектуры средствами программного пакета Statistica 12. Рассматривается метод нейросетевого прогнозирования ряда количества сходов селевых потоков на основе нелинейных связей с рядами осадков и температур. Для решения поставленной задачи в пакете Statistica 12 был использован блок Data Mining (интеллектуальный анализ данных) – Neural Networks (нейронные сети). В качестве нейросетевого метода был выбран многослойный перцептрон MLP (Multilayer perceptron), в качестве функции активации – гиперболический тангенс (tanh). На основе алгоритмов глубокого обучения была разработана математическая модель MPL 2-50-1, способная обучаться на используемых данных (осадки, температура, количество селей за период 1953–2015 гг.) и осуществлять прогнозирование количества схода селей по введенным в модель метеопараметрам (осадки, температура). Получено, что при осредненных значениях осадков с величиной более 110 мм в период с мая по сентябрь с 2016 по 2034 г. прогнозируется количество сходов селей от 10 до 13, что выше среднего их значения $n = 8$ за период с фактическими исходными данными 1953–2015 гг.

Тенденции изменения количества селей в Терскольском ущелье в теплый сезон с 1953 по 2015 гг. (период с фактическими данными) и с 2016 по 2034 гг. (период с прогнозными данными) определены с помощью полиномиального и линейного трендов. Из уравнения линейного тренда следует, что в среднем за весь период, включая прогнозный, количество схода селей имеет тенденцию слабого роста на 0,3/10лет. Полиномиальный тренд демонстрирует рост и снижение количества селей на разных временных интервалах. На интервале прогнозирования 2016–2034 гг. снижение количества селей демонстрируют как полиномиальный тренд, так и линейный.

Ключевые слова: нейронные сети, многослойный перцептрон MLP, функция активации, гиперболический тангенс, прогноз, количество сходов селей, сумма осадков, средние температуры

Для цитирования: Ашабоков Б. А., Ташилова А. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В. Реализация нейросетевой модели в среде Statistica 12 для прогноза частоты схода селей // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 1. С. 37-64. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.2>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.01.2025;
одобрена после рецензирования 11.03.2025;
принята к публикации 21.03.2025.

1.6.18. Atmospheric and Climate Sciences
(Physical and Mathematical Sciences)
Research article

**Implementation of a neural network model
in the Statistica 12 for mudflow
frequency forecasting**

Boris A. Ashabokov^{1,2},
Alla A. Tashilova^{3*},
Lara A. Kesheva⁴,
Nataliya V. Teunova⁵

^{1, 3, 4, 5} High-Mountain Geophysical Institute (2, Lenin Ave., Nalchik, 360001, Russian Federation)

² Institute of Informatics and Regional Management Problems of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (37, Inessa Armand St., Nalchik, 360017, Russian Federation)

^{1, 2} ashabokov.boris@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2889-0864>

³ tashilovaa@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2368-6047>

⁴ kesheva.lara@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5132-1563>

⁵ nata0770@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1135-3587>

* Corresponding author

Abstract.

The article describes some principles of operation of an artificial neural network. It provides an example of implementing a neural network model by selecting its best architecture using the Statistica 12 software package. The article considers a method for neural network forecasting of a series of mudflow events based on nonlinear relationships with precipitation and temperature series. To solve the problem, the Data Mining (intelligent data analysis) block – Neural Networks was used in the Statistica 12 package. A multilayer perceptron (MLP) was chosen as a neural network method, and a hyperbolic tangent (tanh) was used as an activation function. Based on deep learning algorithms, a mathematical model MPL 2-50-1 was developed, which is capable of learning on the used data (precipitation, temperature, number of mudflows for the period 1953-2015) and forecasting the number of mudflows based on the meteorological parameters (precipitation, temperature) entered into the model. It was found that with average precipitation values of more than 110 mm in the period from May to September from 2016 to 2034, the number of mudflows is predicted to be from 10 to 13, which is higher than their average value of $n = 8$ for the period with actual initial data from 1953 to 2015. Trends in the number of mudflows in the Terskol Gorge in the warm season from 1953 to 2015 (the period with actual data) and from 2016 to 2034 (the period with predicted data) were determined using polynomial and linear trends. It follows from the linear trend equation that, on average, over the entire period, including the predicted one, the number of mudflows tends to grow slightly by 0.3/10 years. The polynomial trend demonstrates an increase and decrease in the number of mudflows at different time intervals. In the forecast interval of 2016-2034, the decrease in the number of mudflows demonstrates both a polynomial trend and a linear trend.

Keywords:

neural networks, multilayer perceptron MLP, activation function, hyperbolic tangent, forecast, number of mudflows, precipitation amount, average temperatures

For citation:

Ashabokov BA, Tashilova AA, Kesheva LA, Teunova NV. implementation of a neural network model in the Statistica 12 for mudflow frequency forecasting. Science. Innovations. Technologies. 2025;(1):37-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.2>

Conflict of interest:

the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 26.01.2025;
approved after reviewing 11.03.2025;
accepted for publication 21.03.2025.

Введение

За последние десятилетия для изучения и прогнозирования опасных природных явлений широко используются возможности искусственных нейронных сетей [1, 2]. Искусственные нейронные сети – мощный метод моделирования, позволяющий воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости, в первую очередь – нелинейные, что особенно важно, поскольку научное исследование чаще всего заключается в выявлении скрытых нелинейных закономерностей в наборах данных. В природе многие реальные процессы не могут быть адекватно описаны с помощью традиционных статистических моделей, поскольку имеют либо хаотическую, либо квазипериодическую, либо смешанную основу [3–6]. Поэтому в настоящее время наряду с методами традиционной статистики активно используются возможности искусственного интеллекта, реализованного в нейронных сетях.

Искусственные нейронные сети успешно применяются там, где нужно решать задачи прогнозирования, классификации или автоматизации. Это обусловлено несколькими причинами. Они просты в использовании, учатся на примерах. Пользователь нейронной сети подбирает представительные данные, а затем запускает алгоритм обучения, который автоматически воспринимает структуру данных.

В данной статье будут представлены результаты прогнозирования количества селей с применением метода обучения искусственных нейронных сетей. В качестве исходных данных при разработке регрессионных моделей прогнозирования использованы данные наблюдений средней температуры и сумм осадков метеостанции Терскол, а также данные о сходе селей в теплый сезон (май–сентябрь) 1953–2015 гг. [7, 8].

Метод прогноза количества селей основан на решении задачи аппроксимации функций по набору точек (регрессия) с помощью обучения искусственных нейронных сетей программного пакета Statistica 12, в котором реализован алгоритм подбора наилучшей архитектуры нейронной сети [9–12].

Материалы и методы исследований

В работе предпринята попытка решения задачи прогнозирования количества схода селей в теплый сезон на основе автоматизированных нейронных сетей из пакета Statistica 12. В блоке *Интеллектуальный анализ данных* (Data Mining) был выбран *Нейросетевой метод* (Neural Networks) анализа и прогноза. Из возможных задач, которые решает нейросеть (регрессия, классификация, кластерный анализ и аппроксимация) для решения нашей задачи аппроксимации функции по набору точек, были выбраны *Временные ряды* (регрессия) – Timeseries (regression) (рис. 1, скриншот 1).

Из трех стратегий построения моделей (автоматизированный сетевой поиск (ANS), пользовательская нейросеть (CNN) и метод многократных подвыборок [Subsampling]) – была использована 3-я стратегия для создания модели – это *метод многократных подвыборок* (рис. 1, скриншот 2).

В окошке *Переменные* (Variables) отметили непрерывную целевую переменную – количество селей (4) и две непрерывные входные переменные – температура (2) и осадки (3) (рис. 1, скриншот 3).

В окне *Создание подвыборок* (Subsampling) установили размеры подвыборок (%): обучающая (Train subsampling) – 70 %, контрольная (Test subsampling) – 15 %, тестовая (Validation subsampling) – 15 %, (рис. 1, скриншот 4).

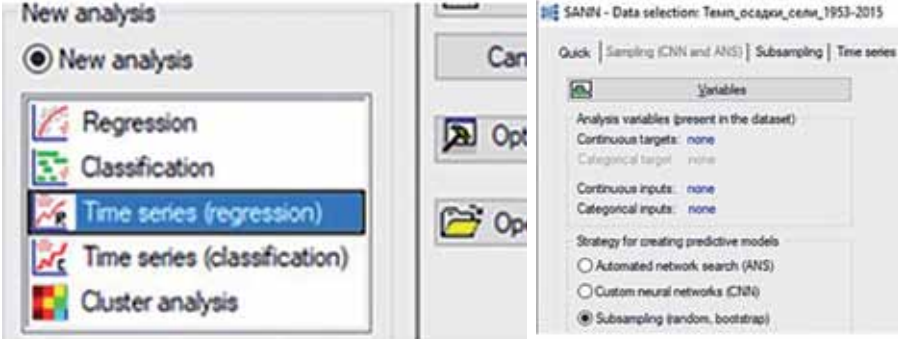
В этой же вкладке в окне *Количество сетей* (Number of subsamples) отметили 10 сетей, которые будут обучаться (рис. 1, скриншот 4).

Из двух возможных алгоритмов – радиальной базисной функции (Radial Basic Function, RBF) и многослойного персептрона (Multilayer perceptron, MLP) был выбран алгоритм многослойного персептрона MLP, который является наиболее широко используемым алгоритмом для расчета оптимального веса (рис. 2а).

Для определения архитектуры сети необходимо выбрать такие параметры, как: 1) число слоев сети (выбрали $n = 10$); 2) число нейронов в каждом слое; 3) используемые функции активации (рис. 2).

1

2



3

4

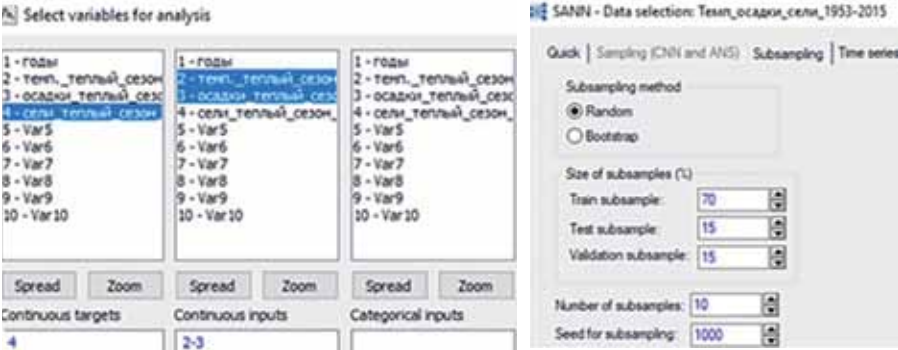
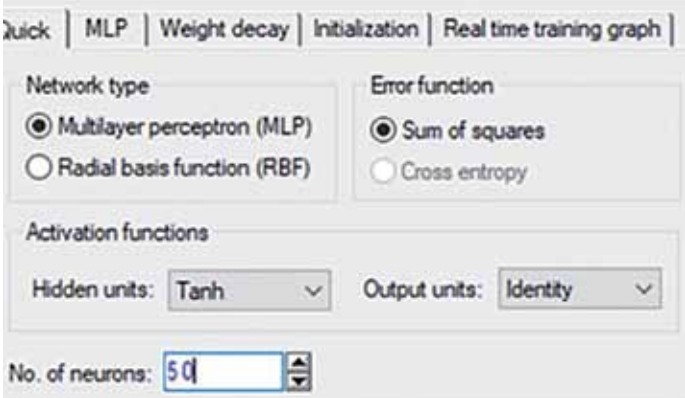


Рис. 1. Последовательность команд для начала работы с нейронными сетями в Statistica 12 (скриншоты).

Fig. 1. Sequence of commands for starting work with neural networks in Statistica 12 (screenshots).

Источник:
Source: составлено авторами.
compiled by the authors.

a



6

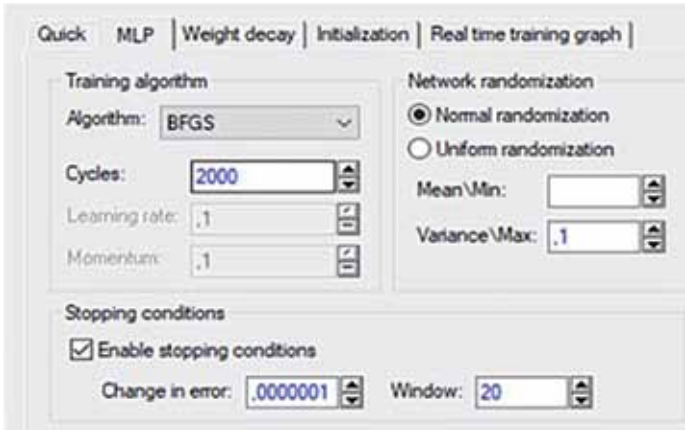


Рис. 2.

Последовательность команд для выбора типа нейросети, функции активации и архитектуры нейросети (скриншоты).

Источник:

Source:

Fig. 2.

Sequence of commands for selecting the type of neural network, activation function and neural network architecture (screenshots).

составлено авторами.

compiled by the authors.

Результаты исследований и их обсуждение

Число нейронов входного слоя определяется числом и видом независимых переменных в модели. Архитектура выходного слоя нейронной сети также диктуется структурой задачи. Для каждой зависимой количественной переменной создается по одному выходному нейрону. К сожалению, до настоящего времени не выработано методик для определения числа скрытых слоев и числа нейронов в них. Имеются лишь оценки, позволяющие оценить соответствие размеров нейронной сети размеру обучающей выборки. На практике число скрытых слоев и нейронов в них определяют экспериментальным путем, анализируя качество аппроксимации, обеспечиваемое сетями разного размера. Интеллектуальные возможности нейросети зависят от количества нейронов и от количества связей между ними.

Выбор функции активации, то есть точной математической функции, выполняющей роль пороговой функции, имеет решающее значение при построении модели нейронной сети, поскольку она напрямую связана с производительностью модели. Наиболее распространенными функциями активации являются сигмоид (1) и гиперболический тангенс (2) [9]:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad (1)$$

$$f(x) = \tanh(x). \quad (2)$$

Эти функции известны как функции сжатия, поскольку они сжимают входные данные (x) из интервала $(-\infty; \infty)$ между $f(x) = 0$ и $f(x) = 1$ (сигмоид) и между $f(x) = -1$ и $f(x) = 1$ (гиперболический тангенс). В качестве функции активации нами был выбран гиперболический тангенс ($\tanh$).

После многократного перебора количества скрытых нейронов остановимся на $N = 50$ (No Of neuron) в скрытом слое сети (рис. 2а).

Выбираем алгоритм обратного обучения-BFGS (градиентный метод второго порядка с двойной точностью), при этом увеличиваем циклы (итерации) или эпохи до 2000 (рис. 2б).

Многослойный персептрон представляет иерархическую сетевую структуру со связанными между собой узлами сети (нейронами), объединенными в несколько слоев. Особенностью многослойного персептрона является наличие более чем одного обучаемого слоя (как правило, два или три). В данной сети один алгоритм обратного распространения ошибки обучает все слои.

Нейрону j в скрытом слое присваивается значение y_j [12]:

$$y_j = \tanh \sum_i^N (x_{ij} x_i + c_j), \quad (3)$$

где N – количество скрытых нейронов,
 w_{ij} и c_j – параметры взвешивания и смещения, соответственно,
 x_i – данные прогноза, нормализованные на четырехкратное SD (стандартное отклонение) наблюдения σ в период обучения из входного слоя, поскольку диапазон входных данных составляет от $-1,0$ до $1,0$.

Этот выход из j -го нейрона (y_j) вводится в выходной слой следующим образом [12]:

$$Z = \sum_j^N (\tilde{w}_j y_j + \tilde{c}), \quad (4)$$

где H – число выходных нейронов,
 $\tilde{w}_j$ и $\tilde{c}$ – вес и смещение от скрытого слоя к выходному слою соответственно.

Процесс обучения нейронной сети – это процесс подбора весовых коэффициентов связей w_i таким образом, чтобы сеть корректно решала поставленную задачу.

Результаты вычисления, выполненного нейронной сетью, определяются ее параметрами – весами связей между нейронами $\tilde{w}_j$ и смещениями $\tilde{c}$. Этот процесс повторяется для минимизации оценочной функции, J [12]:

$$J = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Z_t - O_t)^2}, \quad (5)$$

где O_t – наблюдение на шаге t ,
 T – период обучения.

На этапе обучения обрабатываемые данные перемешиваются и, как было отмечено выше, 70 % используют для обучения, 15 % – для тестирования и 15 % – для проверки. После обучения сети (train) открывается окошко с 10 обученными нейросетями (рис. 3а). Отбирается одна нейронная сеть из 10 обученных сетей по максимальному коэффициенту детерминации в столбцах *обучение, тестирование, валидация* (training, test, validation) с наименьшей ошибкой. Это модель № 2, искусственная нейронная сеть с рабочим названием MLP 2-50-1 (рис. 3б), далее работаем с ней.

Для визуализации результатов модели MLP 2-50-1 запускаем команду *Графики временных рядов* (Time series graph). На рисунке 4 можно увидеть график модельного ряда количества селей теплого сезона за 1953-2015 гг., созданный искусственной нейронной сетью MLP 2-50-1 (красная линия), и визуально оценить качество модели, сравнив его с фактическими данными (график с синей линией).

Далее проведем анализ адекватности модели исходным данным. Анализ остатков (разности между наблюдаемыми и предсказанными значениями) является одним из способов проверки качества модели или степени ее адекватности данным.

Предполагается, что модель адекватна, если выполняются 2 требования: 1) остатки независимы; 2) остатки распределены по нормальному закону.

Если остатки представляют собой временной ряд случайных независимых величин, распределенных по нормальному закону, то это может служить обоснованием пригодности уравнения для прогноза. Из рисунка 5 видно, что гистограмма остатков близка к гауссовой кривой распределения, что подтверждает адекватность модели. На нормализованном графике остатки должны вести себя достаточно хаотично, не должно быть резких выбросов, закономерностей в чередовании знаков (рис. 5б). На рисунке 5б представлены прогнозы количества сходов селей (синие кружочки), сделанные нейронной сетью, они в целом сосредоточены вокруг нормализованной прямой (идеальное совпадение с прямой указывало бы на относительную ошибку, равную 0, и, следовательно, идеальное предсказание). В целом, оба графика характеризуют распределение остатков по нормальному закону, что может служить обоснованием пригодности модели для прогноза.

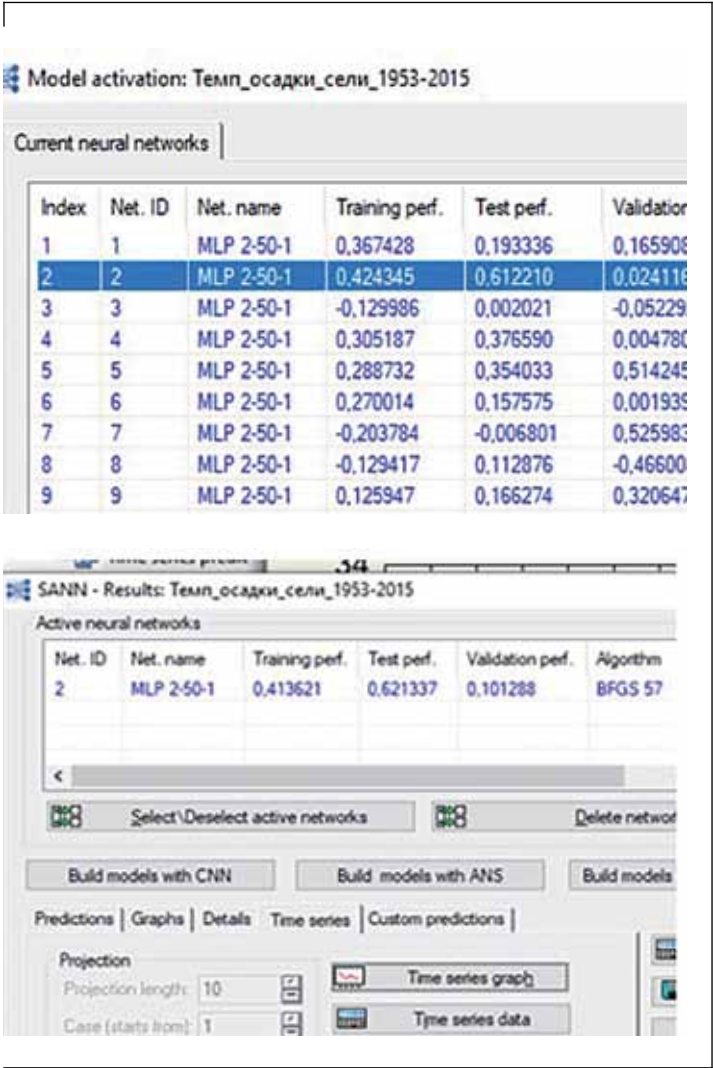


Рис. 3.

Источник:

Source:

Результаты процесса обучения нейросетей (скриншоты).

Fig. 3. Results of the neural network training process (screenshots).

составлено авторами.

compiled by the authors.

Для вычисления относительной ошибки (MAPE) модели по формуле (6), воспользуемся данными таблицы 1 – фактическими $V1$, модельными $V2$ и значениями абсолютной ошибки $V3$ ($V3 = V2 - V1$):

$$MAPE = (abs(V3)/(V1))100 \%$$

(6)

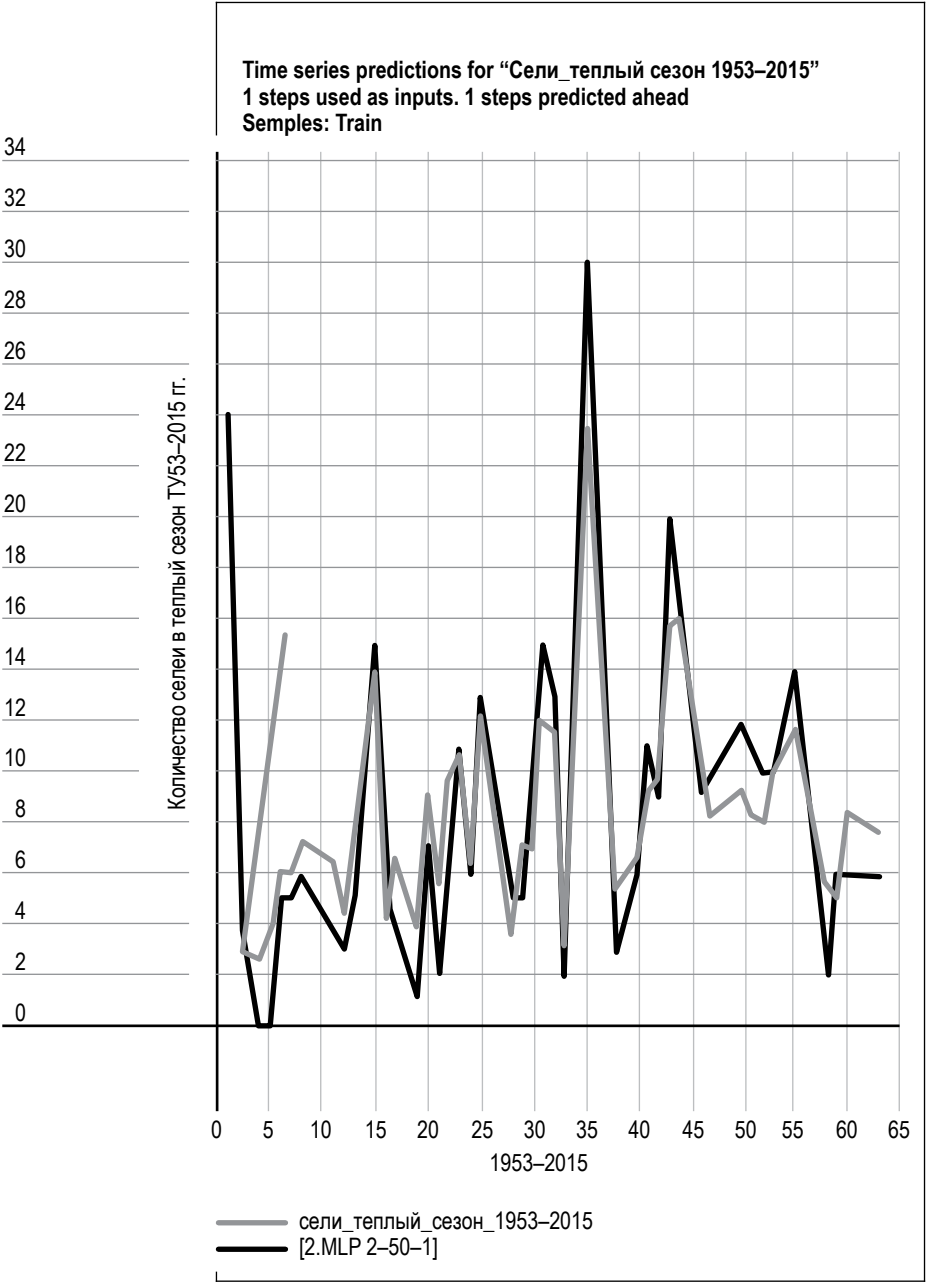


Рис. 4. Графики фактического ряда количества селей в теплый сезон (синий) и модельного MLP 2-50-1 (нейросетевая модель).

Fig. 4. Graphs of the actual series of mudflows in the warm season (blue) and the model MLP 2-50-1 (neural network model).

Источник:
Source:

составлено авторами.
compiled by the authors.

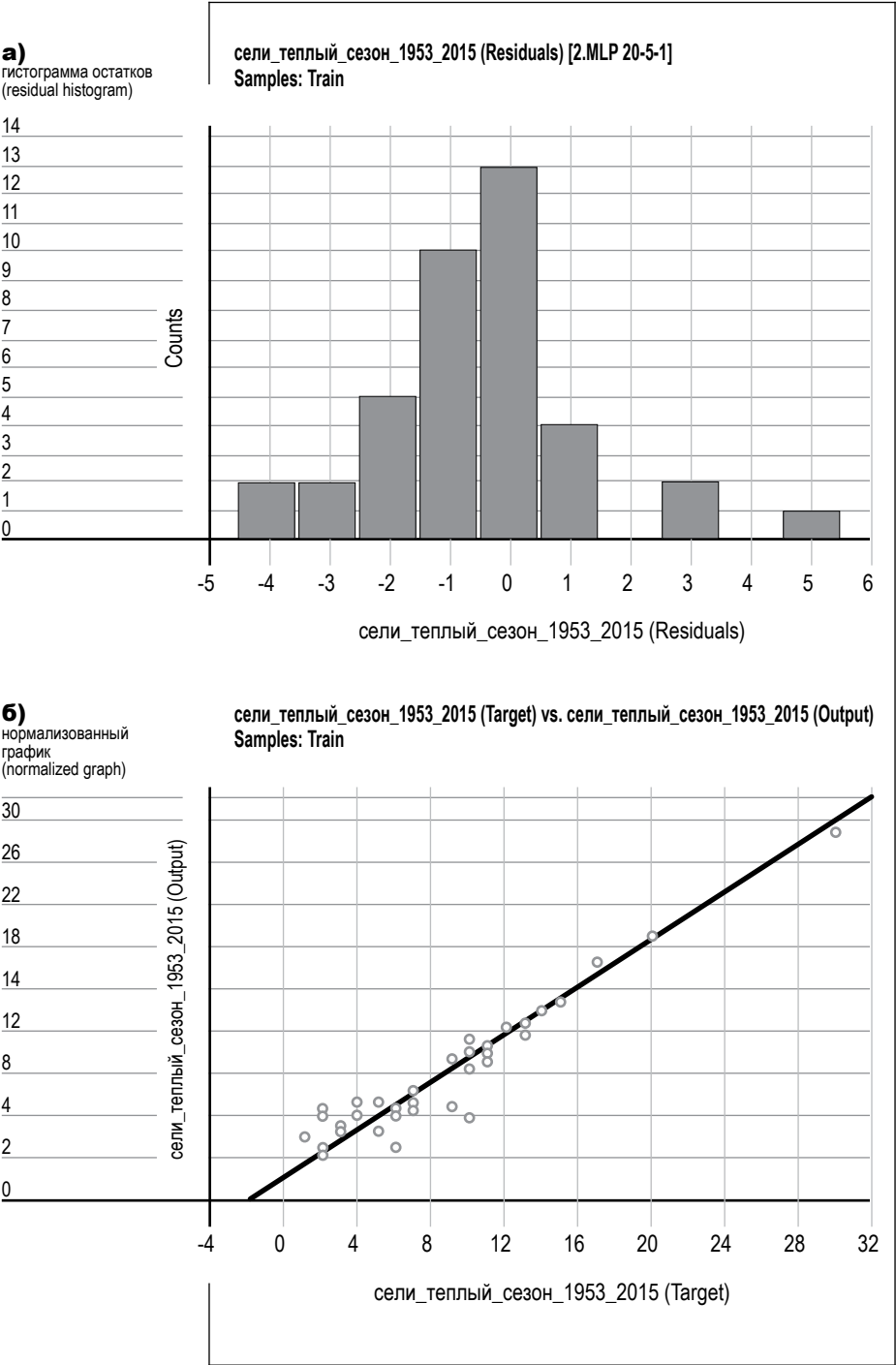


Рис. 5.

Проверка модели на адекватность.

Fig. 5. Checking the model. For adequacy.

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Таблица 1. ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ОШИБКИ (MAPE)
Table 1. Data for calculating the relative error (MAPE)

Таблица прогнозов для ряда «Количество селей_1953-2015» Сеть: 2.MLP 2-50-1				
Количество селей, V1 (target), фактические	Количество селей (MLP 2-50-1), V2 (output), модельные	Абсолютная ошибка V3 (Abs. Res.)	abs (V3)	Относительная ошибка MAPE, %
24	—	—	—	—
4	3,1	-0,952	0,952	23,8
1	2,7	1,734	1,734	173,4
1	3,8	2,767	2,767	276,7
5	6,1	1,134	1,134	22,7
5	6,1	1,091	1,091	21,8
6	7,4	1,357	1,357	22,6
4	6,6	2,557	2,557	63,9
3	5,6	2,546	2,546	84,9
5	7,2	2,210	2,210	44,2
10	12,1	2,077	2,077	20,8
15	14	-1,052	1,052	7
5	4,2	-0,840	0,840	16,8
4	6,8	2,823	2,823	70,6
1	3,8	2,753	2,753	275,3
7	9,1	2,078	2,078	29,7
2	5,4	3,395	3,395	169,7
7	9,7	2,740	2,740	39,1
11	10,7	-0,307	0,307	2,8
6	7	0,994	0,994	16,6
13	11,8	-1,266	1,266	9,7
5	3,6	-1,374	1,374	27,5
5	7,3	2,275	2,275	45,5
9	7	-2,001	2,001	22,2
15	12,	-2,817	2,817	18,8

Таблица прогнозов для ряда «Количество селей_1953-2015»
Сеть: 2.MLP 2-50-1

Количество селей, V1 (target), фактические	Количество селей (MLP 2-50-1), V2 (output), модельные	Абсолютная ошибка V3 (Abs. Res.)	abs (V3)	Относительная ошибка MAPE, %
13	11,5	-1,516	1,516	11,7
2	4,2	2,189	2,189	109,4
30	23,5	-6,469	6,469	21,6
11	11,6	0,623	0,623	5,7
3	5,4	2,427	2,427	80,9
6	6,7	0,709	0,709	11,8
11	9,1	-1,872	1,872	17
9	10,173	1,173	1,173	13
20	17,7	-2,311	2,311	11,6
17	16,1	-0,865	0,865	5,1
9	10,2	1,187	1,187	13,2
10	8,3	-1,730	1,730	17,3
12	9,4	-2,617	2,617	21,8
11	8,4	-2,611	2,611	23,7
10	8	-2,030	2,030	20,3
10	10,2	0,173	0,173	1,7
14	11,7	-2,305	2,305	16,5
2	5,6	3,652	3,652	182,6
6	4,9	-1,073	1,073	17,9
6	8,4	2,370	2,370	39,5
6	7,7	1,654	1,654	27,6
				Осредненное значение MAPE = 48,4%

Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

Точность модели составила 48,4%, что позволяет предположить, что улучшение качества модели возможно как с увеличением качества предикторов, так и с учетом других метеопараметров, влияющих на сход селей (например, орография местности и т.д.).

При этом высокое значение коэффициента корреляции ($r = 0,9483$) между реальными данными V1 и модельными данными V2 подтверждает хорошее согласие модели с фактическими данными.

Прогноз активности селей по нейросетевой модели MLP 2-50-1.

Хорошее качество модели позволяет использовать ее для восстановления и прогноза количества селей на 2016–2034 гг., используя в качестве предикторов температуры и осадки в теплый сезон (май-сентябрь). Ряды температур и осадков 2016–2034 гг. состоят из фактических данных м/станции Терскол с 2016 по 2024 г. и из прогнозных значений, рассчитанных с помощью метода сингулярно-спектрального анализа («Гусеница-SSA») [13–15].

Данные прогноза температур и осадков теплого сезона (май–сентябрь) м/станции Терскол представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. ПРОГНОЗ СРЕДНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОГО СЕЗОНА на 2025–2034 гг.
Table 2. Forecast of average temperature of warm season for 2025–2034

№ п/п	Годы	Исход-ный ряд, °С	Прогноз-ный ряд, °С	№ п/п	Годы	Исход-ный ряд, °С	Прогноз-ный ряд, °С
1	1953	11,3	—	64	2024	10,9	10,8
...	...	...	...	среднее		10,9	10,8
относительная ошибка $\delta = 41\%$							
54	2014	10,9	10,9	65	2025	—	10,2
55	2015	11,3	11,1	66	2026	—	11,1
56	2016	10,1	10,2	67	2027	—	11,4
57	2017	11,1	10,6	68	2028	—	10,9
58	2018	11,4	10,5	69	2029	—	10,9
59	2019	10,7	11,4	70	2030	—	10,7
60	2020	10,9	10,4	71	2031	—	11,9
61	2021	10,8	10,2	72	2032	—	11,0
62	2022	10,8	11,2	73	2033	—	10,9
63	2023	10,8	11,0	74	2034	—	11,1

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

Таблица 3.

ПРОГНОЗ ОСРЕДНЕННОЙ СУММЫ ОСАДКОВ ТЕПЛОГО СЕЗОНА
на 2025–2034 гг.

Table 3. Forecast of average precipitation amount for the warm season
for 2025–2034

№ п/п	Годы	Исходный ряд, мм	Прогнозный ряд, мм	№ п/п	Годы	Исходный ряд, мм	Прогнозный ряд, мм
1	1953	89,4		64	2024	70,8	70,0
...	...	...	...	среднее		92,5	91,9
относительная ошибка δ = 14 %							
54	2014	120,5	120,5	65	2025	—	135,6
55	2015	62,6	79,9	66	2026	—	115,0
56	2016	109,6	88,1	67	2027	—	73,8
57	2017	112,4	95,1	68	2028	—	87,0
58	2018	87,0	86,4	69	2029	—	84,4
59	2019	110,0	101,4	70	2030	—	81,1
60	2020	87,3	117,0	71	2031	—	125,0
61	2021	98,1	105,5	72	2032	—	126,9
62	2022	89,8	84,7	73	2033	—	80,8
63	2023	69,7	62,4	74	2034	—	65,3

Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

Относительная ошибка прогноза определялась по формуле:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i^{\phi} - y_i^{np}}{y_i^{\phi}} \right| \cdot 100 \%,$$

(7)

где y_i^{np} — прогнозные значения на историческом интервале
2014–2024 гг.;

y_i^{ϕ} — фактические значения на этом же интервале.

Ошибки прогноза температуры и осадков методом сингулярно-спектрального анализа, рассчитанные по формуле (7), составили для температуры $\delta = 4,1 \%$, для осадков $\delta = 14 \%$, что характеризует хорошее качество моделей и возможность для дальнейшего использования полученных значений для прогноза количества селей с помощью модели MLP 2-50-1.

Графики рядов температур и осадков за 1953–2034 гг. представлены на рисунках 6–9. На них оранжевым цветом выделены значения с 2016 по 2034 г., которые в дальнейшем будут использоваться для получения прогноза количества селей, используя нейро-

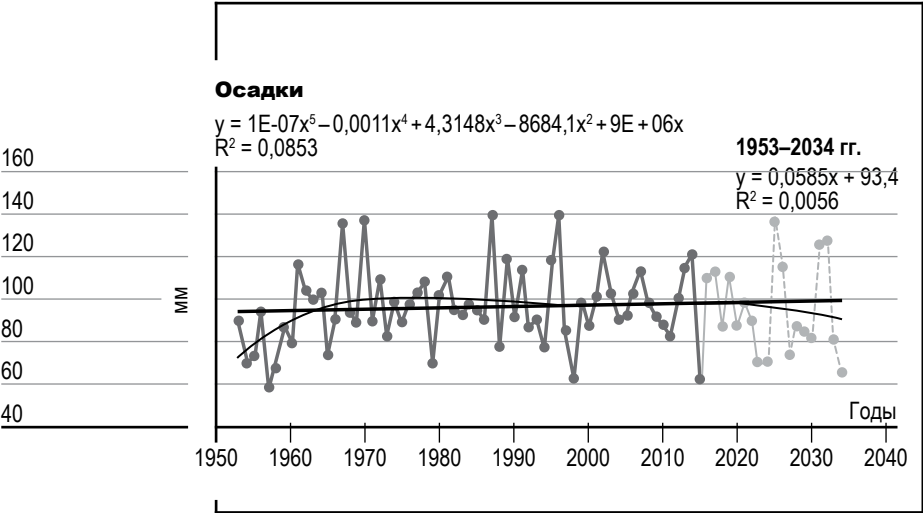


Рис. 6. Осредненная сумма осадков теплого сезона (май–сентябрь) с полиномиальным и линейным трендами, 1953–2034 гг., Терскол (пунктиром – прогноз на 2025–2034 гг., «Гусеница-SSA»).
Fig. 6. Average precipitation for the warm season (May–September) with polynomial and linear trends, 1953–2034, Terskol (dotted line – forecast for 2025–2034, Caterpillar-SSA).
Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

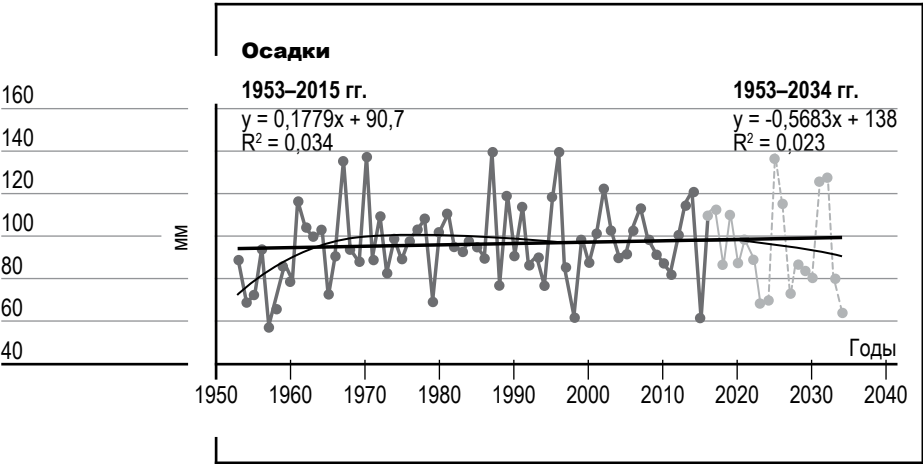


Рис. 7. Осредненная сумма осадков теплого сезона (май–сентябрь) с линейными трендами 1953–2015 гг. и 2016–2034 гг. (пунктиром – прогноз на 2025–2034 гг., «Гусеница-SSA»).
Fig. 7. Average precipitation for the warm season (May–September) with linear trends for 1953–2015 and 2016–2034 (dotted line – forecast for 2025–2034, Caterpillar-SSA).
Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

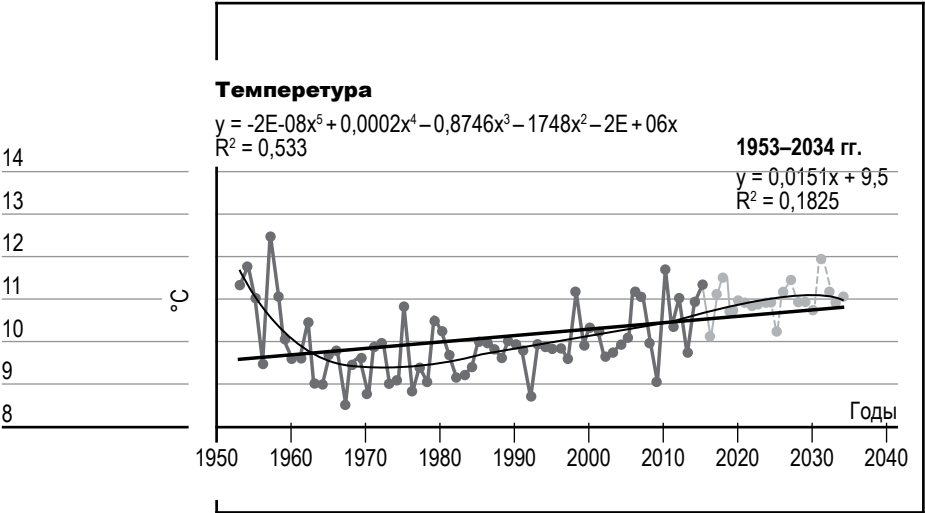


Рис. 8.

Средняя температура теплого сезона (май–сентябрь) с полиномиальным и линейным трендами, 1953–2034 гг., Терскол (пунктиром – прогноз на 2025–2034 гг., «Гусеница-SSA»).
Fig. 8. Average temperature of the warm season (May–September) with polynomial and linear trends, 1953–2034, Terskol (dotted line – forecast for 2025–2034, Caterpillar-SSA).
Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

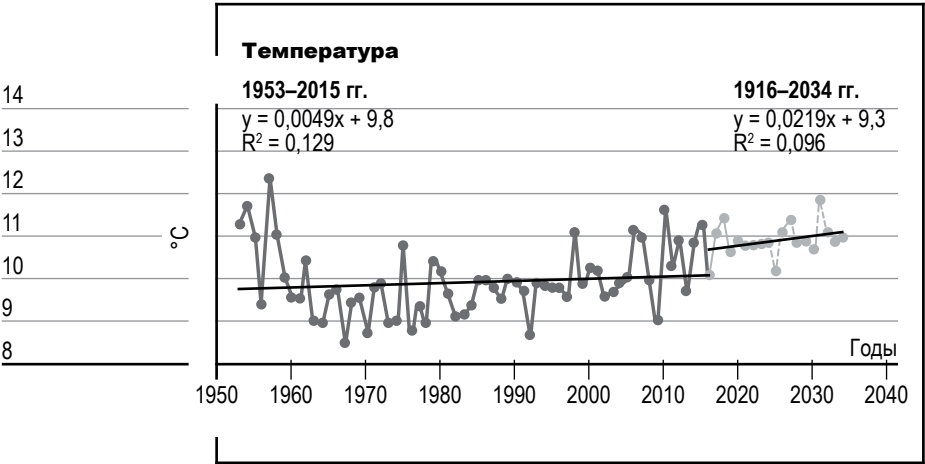


Рис. 9.

Средняя температура теплого сезона (май–сентябрь) с линейными трендами 1953–2015 гг. и 2016–2034 гг., Терскол (пунктиром – прогноз на 2025–2034 гг., «Гусеница-SSA»).
Fig. 9. Average temperature of the warm season (May–September) with linear trends for 1953–2015 and 2016–2034, Terskol (dotted line – forecast for 2025–2034, Caterpillar-SSA)
Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

сетевую модель MPL 2-50-1. Ряды температур и осадков состоят из фактических данных (1953–2024 гг.) и прогнозных данных (2025–2034 гг.), которые выделены пунктирной линией.

В силу естественной изменчивости тренды, основанные на коротких периодах наблюдений, очень чувствительны к датам начала и окончания периода и в целом не отражают долгосрочные климатические тенденции. Поэтому были использованы не только линейные тренды, охватывающие весь период исследования 1953–2015 гг., но и полиномиальный тренд, демонстрирующий изменения в подпериодах, также был выделен линейный тренд для прогнозных данных с 2016 по 2034 г.

Воспользуемся командой *Прогноз пользователя* (Custom Predictions) для прогноза количества селей на базе полученной модели MLP-2-50-1 (рис. 10). Запускаем команду *Прогноз пользователя* и вносим в окошко свои данные по температуре и осадкам за период 2016–2034 гг. (из них с 2016 по 2024 г. – фактические данные м/станции Терскол и с 2025 по 2034 г. – прогнозные данные, полученные с помощью метода Гусеница-SSA, и использования их в модели MLP 2-50-1 для прогноза количества селей. В результате формируем таблицу 4 с прогнозными значениями количества селей с 2016 по 2034 г.

Из таблицы 4 видно, что при осредненных значениях осадков с величиной более 110 мм в период с мая по сентябрь 2016–2034 гг. прогнозируется количество сходов селей от 10 до 13, что выше среднего их значения $n = 8$ за период с фактическими данными 1953–2015 гг. [8].

На рисунке 11 показаны тенденции изменения количества селей в Терскольском ущелье в теплый сезон с 1953 по 2015 г. (период с фактическими данными, сплошная линия) и с 2016 по 2034 г. (период с прогнозными данными, пунктир) с помощью полиномиального и линейного трендов. Из уравнения линейного тренда следует, что в среднем за весь период, включая прогнозный, количество схода селей имеет тенденцию слабого роста на 0,3/10 лет. Полиномиальный тренд демонстрирует рост и снижение количества селей на разных временных интервалах.

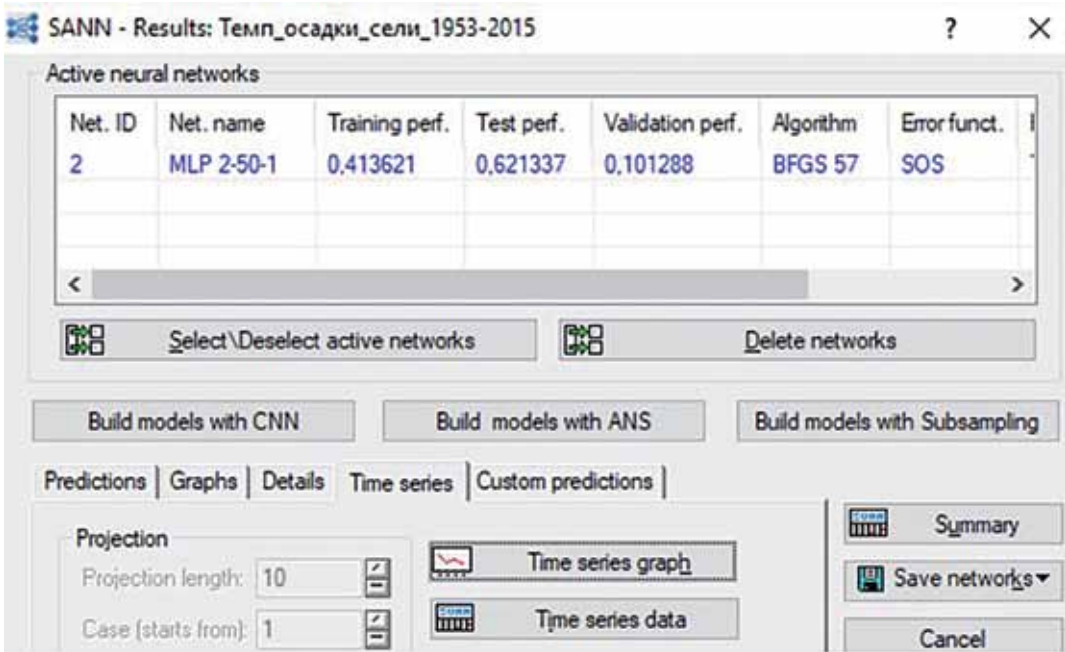


Рис. 10.

Скриншот с командой Прогноз пользователя (Custom Predictions) с нейросетевой моделью MLP 2-50-1.

Fig. 10. Screenshot with the Custom Predictions command with the MLP 2-50-1 neural network model

Источник:
Source:

составлено авторами.
compiled by the authors.

Таблица 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗА КОЛИЧЕСТВА СЕЛЕЙ НА 2016–2034 ГГ.
С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ MLP 2-50-1
Table 4. Results of the forecast of the number of mudflows for 2016-2034
using the neural network model MLP 2-50-1

пп	Годы	Прогноз количества селей по модели MLP 2-50-1		
		Количество селей	Температура (входные)*	Осадки (входные)*
1	2016	8,2	10,12	109,56
2	2017	11,1	11,06	112,36
3	2018	4,6	11,44	87,00
4	2019	10,2	10,66	110,00
5	2020	6,8	10,92	87,32
6	2021	10,4	10,82	98,12
7	2022	8,6	10,80	89,82
8	2023	4,7	10,84	69,74
9	2024	4,6	10,90	70,80
10	2025	13,2	10,20	135,60
11	2026	11,0	11,10	115,04
12	2027	5,0	11,40	73,76
13	2028	6,8	10,90	87,04
14	2029	6,1	10,90	84,36
15	2030	6,7	10,70	81,12
16	2031	10,5	11,90	124,98
17	2032	9,8	11,10	126,90
18	2033	5,3	10,90	80,82
19	2034	4,2	11,00	65,26

Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

* С 2016 по 2024 г. — фактические данные метеопараметров м/станции Терскол, С 2025 по 2034 г. — прогнозные данные, полученные с помощью метода сингулярно-спектрального анализа (Гусеница-SSA).

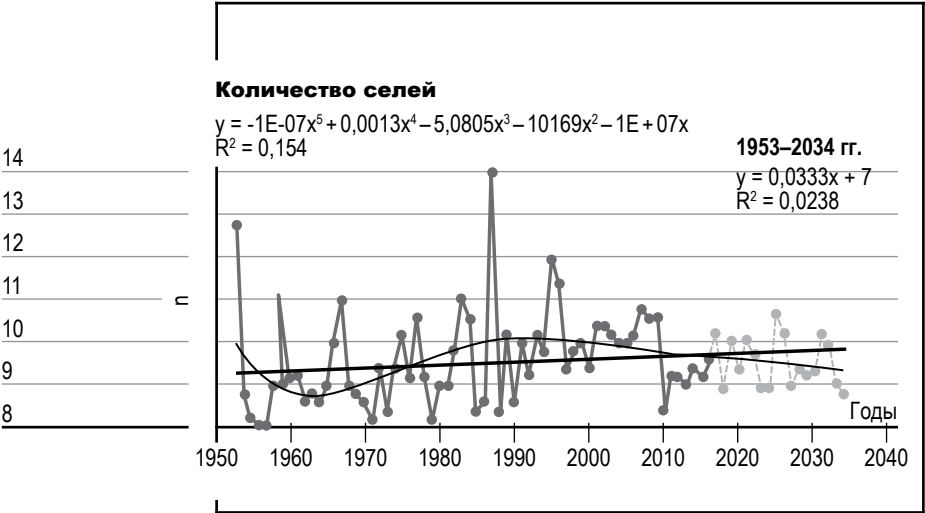


Рис. 11.

Количество селей в теплый сезон (май–сентябрь) с полиномиальным и линейным трендами, 1953–2034 гг., Терскол (пунктиром – прогноз на 2016–2034 гг., нейросетевая модель MLP 2-50-1).

Fig. 11. The number of mudflows in the warm season (May-September) with polynomial and linear trends, 1953-2034, Terskol (dotted line – forecast for 2016–2034, neural network model MLP 2-50-1)

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

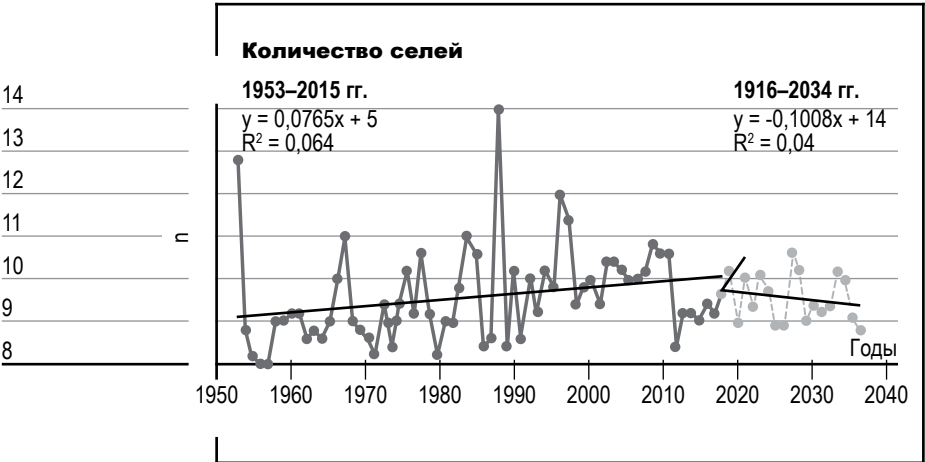


Рис. 12.

Количество селей с линейными трендами 1953–2015 гг. и 2016–2034 гг. (пунктиром – прогноз на 2016–2034 гг., нейросетевая модель MLP 2-50-1).

Fig. 12. Mudflows with linear trends for 1953–2015 and 2016–2034 (dotted line – forecast for 2016–2034, neural network model MLP 2-50-1).

Источник: составлено авторами. Source: compiled by the authors.

На рисунке 12 выделены два временных интервала: с 1953 по 2015 г. – период с фактическими данными (сплошная голубая линия) и с 2016 по 2034 г. – период с прогнозными данными (оранжевый пунктир). Как видно из рисунков 11 и 12, снижение количества селей на интервале прогнозирования 2016–2034 гг. (оранжевый пунктир) демонстрируют как полиномиальный тренд, так и линейный.

Из сравнения с рисунками 7 и 8 (осадки) видно, что отрицательная тенденция количества селей на интервале прогнозирования идентична тенденции суммы осадков в теплый сезон, а именно, их снижение, и происходит это на фоне роста температур (рисунки 9 и 10).

Заключение

Таким образом, на основе алгоритмов глубокого обучения была разработана математическая модель MPL 2-50-1, способная обучаться на используемых данных (осадки, температура, количество селей за период 1953–2015 гг.), и осуществлять прогнозирование количества селей по метеопараметрам (осадки, температура). Получено, что при осредненных значениях осадков с величиной более 110 мм в период с мая по сентябрь с 2016 по 2034 г. прогнозируется количество сходов селей от 10 до 13, что выше среднего их значения $n = 8$ за 1953–2015 гг. – периода с фактическими данными.

Точность модели составила 48,4 %, что позволяет предположить, что улучшение качества модели возможно как с увеличением качества предикторов, так и с учетом других метеопараметров, влияющих на сход селей (например, орография местности и т.д.).

Такие модели необходимы для реализации следующих задач – формулировки методологии, а именно, системы методов, которые используются для решения исследовательской задачи и затем разработки модели снижения рисков опасных склоновых явлений.

Список источников

1. Солдатенко С. А. Искусственный интеллект и его применение в задачах численного прогноза погоды // Метеорология и гидрология. 2024. № 4. С. 5–27.

2. Сумачев А. Э., Банщикова Л. С., Грига С. А. Применение методов обучения искусственных нейронных сетей при прогнозировании высших уровней воды на примере рек Двинско-Печорского бассейнового округа // Метеорология и гидрология. 2024. № 4. С. 104–115.
3. Ашабоков Б. А., Ташилова А. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В. Модель синусоидальной регрессии для оценки динамики селевых сходов // Наука. Инновации. Технологии. 2024. № 3. С. 71–94. <https://doi.org/0.37493/2308-4758.2024.3.4>
4. Золина О. Г., Булыгина О. Н. Современная климатическая изменчивость характеристик экстремальных осадков в России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 84–103.
5. Ashabokov B. A., Tashilova A. A., Kesheva L. A., Teunova N. V. Analysis of climate change in the Caucasus region: the end of the 20th - the beginning of the 21st century // CLIMATE. Special issue: Climate Variability and Change in the 21th Century. CLIMATE. 2019. Vol. 7. No. 11. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/cli7010011>
6. Yun W.-T., Krishnamurti T. N. Linear and non-linear multi-model superensemble prediction model // Atmosphere. 2002. No. 12 (3). P. 26–31.
7. Кондратьева Н. В. Распространение и особенности проявления селевых процессов на северном и юго-западном склонах Большого Кавказа. дис. ... док. геогр. наук: 25.00.23 / Кондратьева Наталия Владимировна. Нальчик. 2018. 402 с.
8. Ташилова А. А., Федченко Л. М., Залиханов М. Ч., Кондратьева Н. В. Анализ динамики селей на фоне климатических изменений в высокогорной зоне Кабардино-Балкарии // Наука. Инновации. Технологии. 2024. № 1. С. 69–90. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.1.4>
9. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks. Методология и технологии современного анализа данных / Под ред. В. П. Боровикова. 2-е изд. Телеком, 2008. 392 с.
10. Электронный учебник по статистике. URL: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (дата обращения 27.06.2024).
11. Филатова Т. В. Применение нейронных сетей для аппроксимации данных // Вестник Томского государственного университета. 2004. № 284. С. 121–125.
12. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд.: пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.

13. Голяндина Н. Э. Метод «Гусеница»-SSA. Анализ временных рядов. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 76 с.
14. Голяндина Н. Э. Метод «Гусеница»-SSA. Прогноз временных рядов. СПб: Изд-во СПбГУ, 2004. 52 с.
15. Golyandina N., Nekrutkin V., Zhigljansky A. Analysis of Time Series Structure // SSA and Related Techniques. London Chapman & Hall/CRC, 2001. 305 p.

References

1. Soldatenko SA. Artificial intelligence and its application in numerical weather forecasting problems. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2024;(4):5-27. (In Russ.).
2. Sumachev AE, Bانشchikova LS, Griga SA. Application of artificial neural network training methods in forecasting higher water levels using the example of the rivers of the Dvina-Pechora basin district. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2024;(4):104–115. (In Russ.).
3. Ashabokov BA, Tashilova AA, Kesheva LA, Teunova NV. Sinusoidal regression model for assessing the dynamics of mudflows. *Science. Innovations. Technologies*. 2024;(3):71-94. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.3.4>
4. Zolina OG, Bulygina ON. Modern climatic variability of characteristics of extreme precipitation in Russia. *Fundamental and Applied Climatology*. 2016;(1):84-103. (In Russ.).
5. Ashabokov BA, Tashilova AA, Kesheva LA, Teunova NV. Analysis of climate change in the Caucasus region: the end of the 20th - the beginning of the 21st century. *CLIMATE. Special issue: Climate Variability and Change in the 21st Century. CLIMATE*. 2019;7(11):1-15. <https://doi.org/10.3390/cli7010011>
6. Yun W-T, Krishnamurti TN. Linear and non-linear multi-model superensemble prediction model. *Atmosphere*, 2002;12(3):26-31.
7. Kondratieva NV. Distribution and features of manifestation of mudflow processes on the northern and southwestern slopes of the Greater Caucasus. dissertation of dr. of geogr. sciences. Nalchik. 2018. 402 p. (In Russ.).
8. Tashilova AA, Fedchenko LM, Zalikhanov MCh, Kondratieva NV. Analysis of mudflow dynamics against the background of climate change in the high-mountain zone of Kabardino-Balkaria. *Science. Innovations. Technologies*. 2024;(1):69-90. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.1.4>
9. Neural networks. *STATISTICA Neural Networks. Methodology*

- and technologies of modern data analysis. Ed. V.P. Borovikov. 2nd ed. Telecom; 2008. 392 p. (In Russ.).
10. Electronic textbook on statistics. Available from: <http://statsoft.ru/home/textbook/default.htm> [Accessed 27 June 2024]. (In Russ.).
 11. Filatova TV. Application of neural networks for data approximation. Toms State University Journal. 2004;(284):121-125. (In Russ.).
 12. Khaikin S. Neural networks: full course. 2nd ed.: trans. from English. Moscow: Williams Publishing House; 2006. 1104 p. (In Russ.).
 13. Golyandina NE. The Caterpillar-SSA Method. Time Series Analysis. SPb: SPbSU Publishing House; 2004. 76 p. (In Russ.).
 14. Golyandina NE. The Caterpillar-SSA Method. Time Series Forecast. SPb: SPbSU Publishing House; 2004. 52 p. (In Russ.).
 15. Golyandina N, Nekrutkin V, Zhigljansky A. Analysis of Time Series Structure/ SSA and Related Techniques. London Chapman & Hall/CRC; 2001. 305 p.

Информация об авторах

Борис Азреталиевич Ашабоков – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом физики облаков Высокогорного геофизического института; заведующий отделом Института информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН, Scopus ID: 6505916110, Researcher ID: K-4299-2015.

Алла Амарбиевна Ташилова – доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории микрофизики облаков Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 57191577384, Researcher ID: K-4321-2015.

Лара Асировна Кешева – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории атмосферных конвективных явлений Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 57191577471, Researcher ID: K-4261-2015.

Наталия Вячеславовна Теунова – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории микрофизики облаков Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 57191571952, Researcher ID: K-4312-2015.

Вклад авторов: все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации статьи.

Information about the authors

Boris A. Ashabokov – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Department of Cloud Physics, High Mountain Geophysical Institute; Head of Department at the Institute of Informatics and Regional Management Problems, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Scopus ID: 6505916110, Researcher ID: K-4299-2015.

Alla A. Tashilova – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Leading Researcher at the Laboratory of Cloud Microphysics, High Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 57191577384, Researcher ID: K-4321-2015.

Lara A. Kesheva – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher at the Laboratory of Atmospheric Convective Phenomena, High Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 57191577471, Researcher ID: K-4261-2015.

Nataliya V. Teunova – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher at the Laboratory of Cloud Microphysics, High Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 57191571952, Researcher ID: K-4312-2015.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.



Научная статья
УДК 551.557.59
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.3>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗГОНКИ МЕТАЛЛОВ НА ИХ ЛЬДООБРАЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ

Бузигит Муссаевич Хучунаев¹,
Сафият Омаровна Геккиева²,
Алим Хадисович Будаев^{3*}

^{1, 2, 3} Высокогорный геофизический институт (д. 2, пр. Ленина, Нальчик, 360001, Российская Федерация)

¹ buzgigit@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6606-5996>

² sgekkieva@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8369-812X>

³ budayalim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3481-8663>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Объектом исследования являются кластеры из нановолокон оксидов металлов. В работе приводятся результаты исследования льдообразующих свойств кластеров из нановолокон оксидов цинка и алюминия. В ходе лабораторного моделирования эксперименты проводились в условиях, приближенных к реальным, – в искусственной облачной среде при отрицательных температурах. Использован комплекс аппаратуры, в составе которого малая и большая облачные камеры, которые соединены друг с другом посредством трубы. В малую облачную камеру закладывается реагент и запускается водяной пар. После создания искусственного тумана проводится термическая возгонка реагента и вносится смесь в большую облачную камеру. На дне камеры открываются подложки для сбора частиц реагента образующихся ледяных кристаллов. Затем частицы реагента и ледяные кристаллы изучаются под оптическим и электронным микроскопами. Выявлены особенности синтеза кластеров из нановолокон оксидов металлов и удельного выхода в зависимости от температуры возгонки, относительной влажности в облачной камере. Как показали эксперименты, при возгонке металлов при высоких температурах (800–2000 °С) в присутствии воды образуются кластеры, которые состоят из плотно упакованных наночастиц (нитевидных нановолокон и нанотрубок). Кластеры, попадая в облачную среду, наполняются водой и срабатывают активные зоны, образуются кристаллы льда. По

данным экспериментов оксиды металлов обладают неплохими льдообразующими свойствами, особенно в температурном диапазоне $-8 \dots -9$ °C. Для оксида цинка этот показатель составляет порядка 1013 частиц с 1 грамма. Оксид алюминия проявляет меньшую льдообразующую активность. Результаты экспериментов показывают, что имеется принципиальная возможность и целесообразность использования кластеров из нановолокон оксидов металлов в качестве добавки к штатному пиротехническому составу или как самостоятельных льдообразующих реагентов.

Ключевые слова: активные воздействия, пиротехнический состав, реагент, льдообразующие частицы, оксид цинка, оксид алюминия, кластеры, нановолокна, нанотрубки, удельный выход

Для цитирования: Хучунаев Б. М., Геккиева С. О., Будаев А. Х. Исследование воздействия температуры возгонки металлов на их льдообразующие свойства в условиях высокой относительной влажности // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 1. С. 65–88. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.3>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 04.11.2024;
одобрена после рецензирования 23.01.2025;
принята к публикации 07.02.2025.

**1.6.18. Atmospheric and Climate Sciences
(Physical and Mathematical Sciences)**
Research article

**The study of the effect of sublimation
temperature of metals on their
ice-forming properties under high relative
humidity conditions**

**Buzigit M. Khuchunaev¹,
Safiyat O. Gekkieva²,
Alim Kh. Budaev^{3*}**

^{1, 2, 3} High-Mountain Geophysical Institute (1, Lenin Ave., Nalchik, 360001, Russian Federation)

¹ buzgigit@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6606-5996>

² sgekkieva@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8369-812X>

³ budayalim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3481-8663>

* Corresponding author

Abstract.

Clusters of nanofibers of metal oxides serve the object of the research. The paper studies the ice-forming properties of clusters of nanofibers of zinc, aluminum oxide. During the laboratory simulation, the experiments were carried out in conditions close to real ones – in an artificial cloud environment at subzero temperatures. A set of equipment, which includes small and large cloud chambers connected to each other by means of a pipe, was used. A reagent was placed in a small cloud chamber and water vapor was started. After creating an artificial fog, the reagent was thermally sublimated and the mixture was introduced into a large cloud chamber. At the bottom of the chamber, substrates were opened to collect reagent particles of the formed ice crystals. The reagent particles and ice crystals were then studied under optical and electron microscopes. The features of the synthesis of clusters from nanofibers of metal oxides and the specific yield depending on the sublimation temperature and relative humidity in the cloud chamber are revealed. Experiments have shown that when metals are sublimated at high temperatures (800–2000 °C) in the presence of water, clusters that consist of tightly packed nanoparticles (filamentous nanofibers and nanotubes) are formed. Clusters, falling into a cloudy environment, are filled with water and active zones are triggered, ice crystals are formed. According to experimental data, metal oxides have good ice-forming properties, especially in the temperature range of –8... –9 °C. For zinc oxide, this indicator is about 1013 particles per 1 gram. Aluminum oxide exhibit less ice-forming activity. The experimental results show that there is a fundamental possibility and expediency of using clusters of metal oxide nanofibers as an additive to the standard pyrotechnic composition or as independent ice-forming reagents.

Keywords:

weather modification, pyrotechnic composition, reagent, ice-forming particles, zinc oxide, aluminum oxide, clusters, nanofibers, nanotubes, specific yield

For citation:

Khuchunaev BM, Gekkieva SO, Budaev AKh. The study of the effect of sublimation temperature of metals on their ice-forming properties under high relative humidity conditions. Science. Innovations. Technologies. 2025;(1):65-88. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.3>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 04.11.2024;
approved after reviewing 23.01.2025;
accepted for publication 07.02.2025.

Введение

Проведение работ по активным воздействиям на облачные процессы сопряжено с немалыми экономическими издержками, связанными как со стоимостью работ, так и с ценой противоградовых изделий (ПГИ). В последние годы отмечается рост стоимости основных компонентов штатного пиротехнического состава АД-1, применяемого в ПГИ типа «Алазань-6» и «Алазань-9». Данный состав используется для воздействия на переохлажденные облака и содержит перхлорат аммония, фенолформальдегидную смолу, дициандиамид, смесь тонкоизмельченных порошков йодидов серебра, калия и меди, в качестве технологических добавок графит, масло индустриальное, технический углерод [1]. Следует также отметить и экологическую сторону проблемы, связанную с токсичностью йодидов металлов, в частности, йодида серебра [2, 3]. При этом по данным исследований [4–6] наночастицы оксидов цинка и алюминия, полученные в среде водяного пара, экологически безвредны.

Отметим, что в настоящее время растет стоимость противоградовых изделий, которая за последние годы выросла в 1,5 раза (рис. 1).

Отметим, что важным параметром эффективности реагентов является быстрое действие реагента, определяемое как количество активных льдообразующих ядер, образующихся в течение 2 минут после возгонки реагента [8]. По данным исследований кинетики активации аэрозолей, генерируемых пиросоставами, наилучшие результаты имели пиросоставы BR-91-Y, 50-04-11. Ледяные кристаллы появлялись через 3–5 минут после внесения реагентов в переохлажденную облачную среду [9]. По данным лабораторных экспериментов, проведенных в ВГИ, первые кристаллы появляются через 2 минуты после возгонки цинка или алюминия в среде водяного пара.

Порог кристаллизующего действия йодистого серебра, входящего в состав применяемых в практике активных воздействий льдообразующих реагентов, составляет -3°C , при этом реагент активно работает при температурах ниже -6°C . [10, 11]. Для уменьшения «непроизводительных» потерь облачной влаги и тем самым повы-

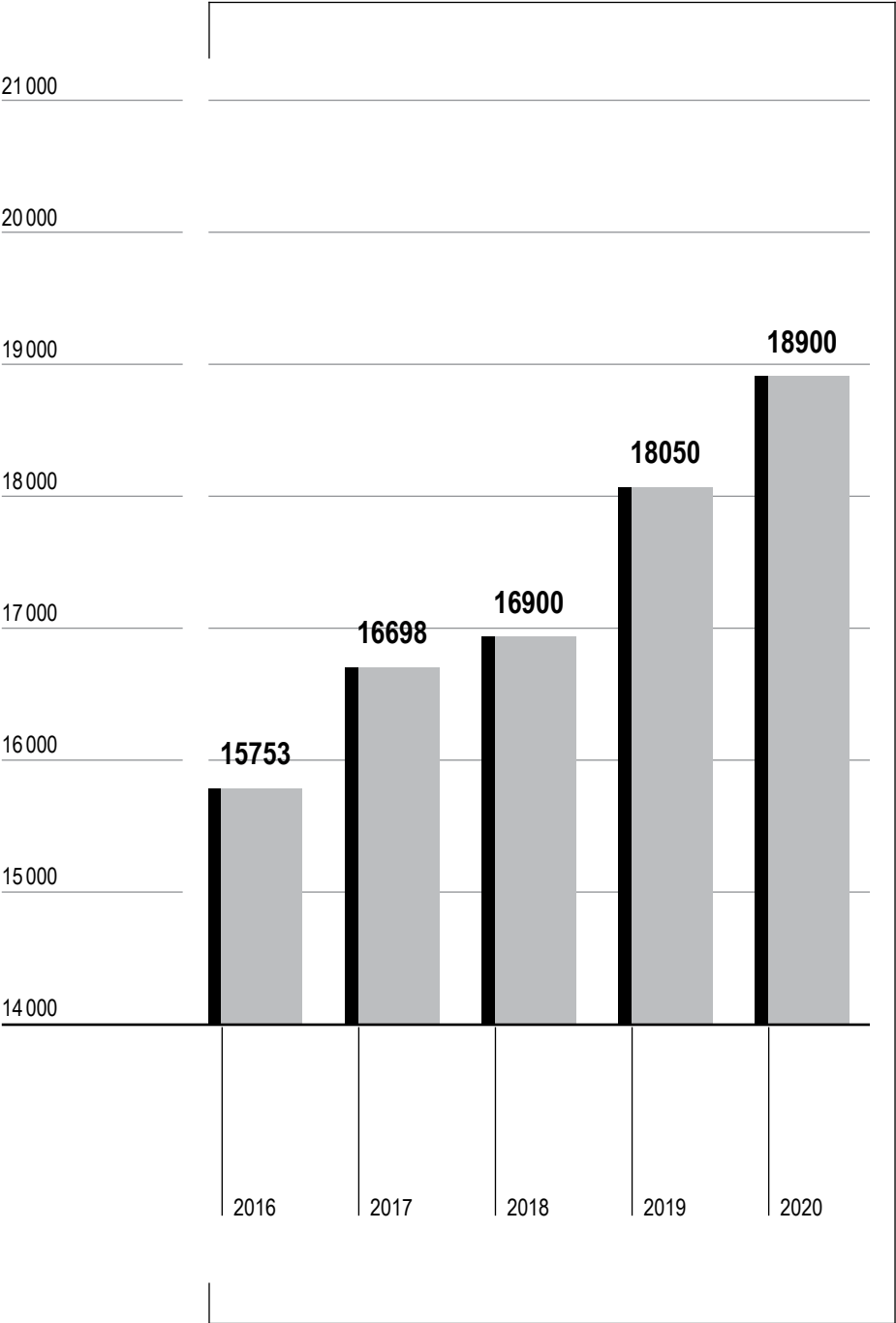


Рис. 1. Динамика изменения цены противогорадовых изделий «Алазань-6».
Fig. 1. Dynamics of price changes of anti-hail products “Alazan-6”.
Источник: составлено авторами по данным [7].
Source: compiled by the authors according to data [7].

шения эффективности осадкообразования в практике активных воздействий на облачные процессы необходимы реагенты с более высоким порогом кристаллизации.

Поэтому актуальной становится задача по разработке новых и совершенствованию существующих пиротехнических составов и средств их доставки. Необходимо отметить, что при термической возгонке металлов образуются наноразмерные частицы. При возгонке в среде водяного пара образуются кластеры, которые состоят из нанотрубок и нановолокон. По данным исследований [12–14] нанотрубки малого диаметра, синтезированные в среде водяного пара, мгновенно заполняются водой, которая приобретает в них льдоподобную структуру. Такие трубки являются открытыми и малодетектными. Исследования образования кластеров оксидов металлов открывает перспективу для разработки нового класса эффективных льдообразующих реагентов.

Материалы и методы исследований

Для проведения исследований создан комплекс специальной аппаратуры: большая облачная камера, малая облачная камера, устройство для возгонки реагента, ультразвуковой генератор тумана, весы, оптический микроскоп, пирометр (рис. 2).

В лабораторных экспериментах использован метод для получения наночастиц (нанотрубок), представленный в работе Б.М. Хучунаева и соавторов [15].

На электронных весах взвешивается определенное количество мелкоизмельченного металла и загружается на графитовую подложку устройства для возгонки реагента. Для исследования льдообразующих свойств на дне большой облачной камеры устанавливаются подложки. В малой камере создается облачная среда и проводится высокотемпературная возгонка. На контакты подложки подается ток высоких значений и нагревает графит и реагент (рис. 3).

Термическая возгонка производится в малой камере для исключения влияния нагревания воздуха в камере на процесс образования ледяных кристаллов на продуктах возгонки. С появлением ледяных кристаллов открываются подложки. Подложки поочередно

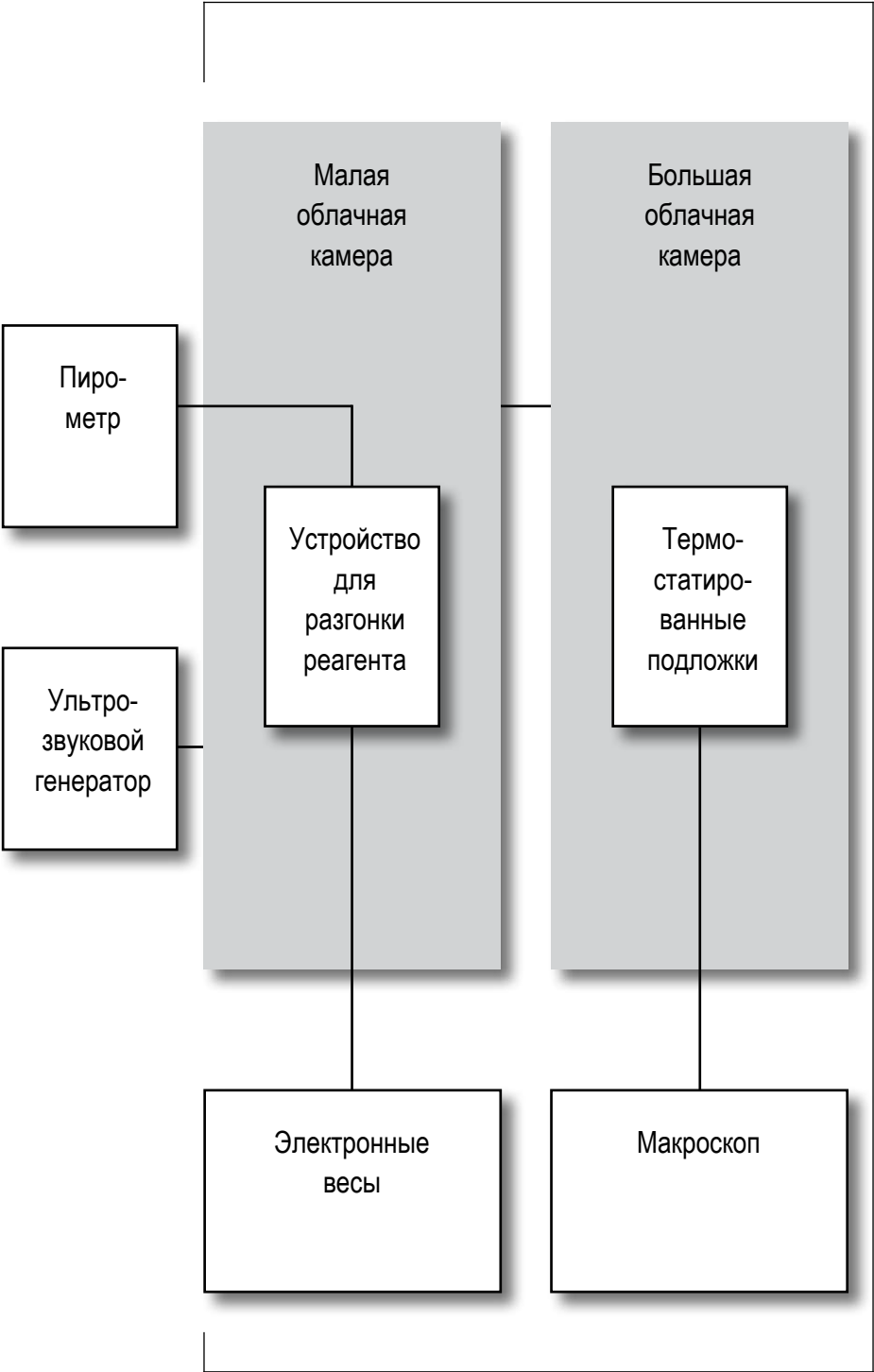


Рис. 2. Комплекс аппаратуры для проведения экспериментов.
Fig. 2. A set of equipment for conducting experiments.



Рис. 3.

Возгонка металла с графитовой подложки.

Fig. 3. Sublimation of metal from a graphite substrate.

извлекаются из камеры до завершения выпадения ледяных кристаллов и изучаются под оптическим микроскопом.

Предварительные эксперименты показывают, что при нагревании металлов в присутствии водяного пара до температуры 800–2000 °С образуются кластеры из оксидов металлов, имеющие шаровидную форму. Кластеры состоят из плотно упакованных нитевидных нановолокон и нанотрубок. Расстояние между наночастицами колеблется от 0 до нескольких нм. Диаметр нитевидных нановолокон и нанотрубок составляет 0,8–1,5 нм, длина несколько мкм. Кластеры имеют два вида активной зоны – зона нахождения нанотрубок и нановолокон, и зона промежутков (щелей) между нановолокнами и нанотрубками. Кластеры, попадая в облачную среду, наполняются водой и срабатывают активные зоны, образуются кристаллы льда. Таких активных центров в кластерах сотни и более, по мере роста кристаллов льда они объединяются и образуют большие кристаллы.

По результатам рентгеноструктурных исследований воды в однослойных углеродных нанотрубках [16] были найдены полигональные структуры с числом молекул в них от 5 до 8 в зависимости от диаметра нанотрубок в интервале 1,1 – 1,7 нм. Установлено, что температура таяния ледяных структур составляла –83, –53, +7, +27 °С по мере убывания числа молекул от 8 к 5 в сечении трубок. Эти результаты противоречат ранее установленной тенденции понижения температуры замерзания воды в порах по мере уменьшения их размеров.

Результаты исследований и их обсуждение

Проведены лабораторные исследования механизмов кристаллизации воды в наночастицах (нанотрубках), образующихся при возгонке металлов в присутствии водяного пара.

Алюминий относится к группе лёгких металлов. Температура плавления алюминия – 660 °С, температура кипения – 2518,8 °С. Цинк – переходный металл. Температура плавления цинка – 419,6 °С, температура кипения – 906,2 °С [17].

При возгонке металлов в присутствии водяного пара образуются скопления наночастиц (кластеры) оксидов металлов (рис. 4).



Рис. 4. Кластер оксида цинка.
Fig. 4. Zinc oxide cluster.

Помимо кластеров в продуктах возгонки встречаются отдельные нитевидные кристаллы. Кластеры, полученные в сухой камере (рис. 5), льдообразующими свойствами не обладают. Водяной пар играет основную роль в образовании льдообразующих наноструктур оксидов металлов.

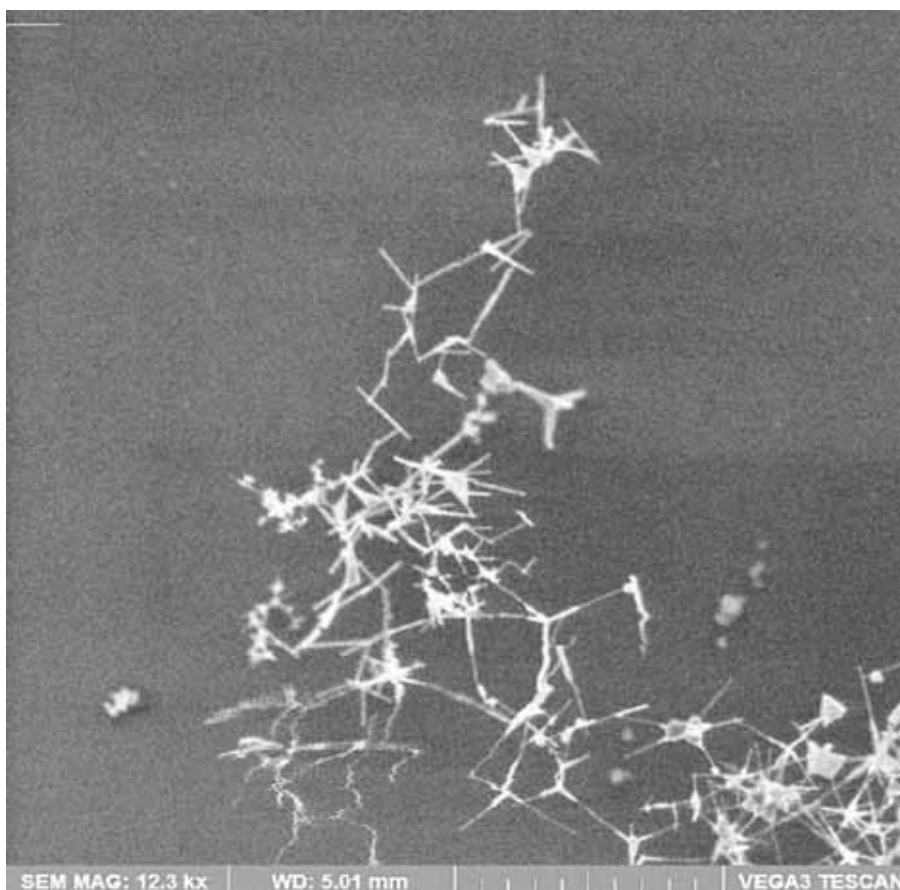


Рис. 5.

Кластеры оксида цинка при возгонке в сухой камере.

Fig. 5. Zinc oxide clusters during sublimation in a dry chamber.

Процесс образования нитевидных кристаллов происходит по двум основным механизмам:

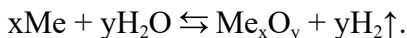
«пар – жидкость – твердое тело»

и

«пар – твердое тело».

В первом случае частицы из газовой среды конденсируются на катализаторе, образуя жидкую каплю. Когда концентрация паров металла в капле достигает предела насыщения, происходит зарождение нитевидного кристалла, который начинает расти. В результате формируется нитевидный кристалл чистого металла.

Эксперименты проводились в присутствии водяного пара, который при возгонке вступает в реакцию с металлом и разлагается:



Когда парциальное давление кислорода увеличивается, начинает действовать второй механизм роста – «пар – твердое тело». Это приводит к образованию нитевидных кристаллов оксида металла.

Исследования показывают, что при возгонке в основном образуются частицы оксида металлов, что позволяет сделать вывод о том, что основной механизм – это механизм «пар – твердое тело».

На рисунках 6 и 7 показаны фотографии нитевидных кристаллов для оксида цинка и оксида алюминия, полученные с помощью оптического микроскопа.

Определены размеры кластеров из наночастиц, образующихся при термической возгонке цинка и алюминия в среде водяного пара. Получено, что с ростом температуры возгонки от 800 до 2000 °С происходит изменение процесса окисления. В таблицах 1 и 2 и на рисунках 8 и 9 показаны зависимости размеров кластеров



Рис. 6. Нитевидные кристаллы оксида цинка.
Fig. 6. Filamentous crystals of zinc oxide.



Рис. 7. Нитевидные кристаллы оксида алюминия.
Fig. 7. Filamentous crystals of aluminum oxide.

Таблица 1. ЗАВИСИМОСТЬ РАЗМЕРОВ КЛАСТЕРОВ ИЗ НАНОЧАСТИЦ
ОКСИДА ЦИНКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗГОНКИ, %
Table 1. Dependence of the size of clusters of zinc oxide nanoparticles
on the sublimation temperature, %

Размер, мкм	560 °С	840 °С	1150 °С	1530 °С
0,1–2,0	0,0	0,0	2,6	33,1
2,1–4,0	0,0	0,0	12,4	30,3
4,1–6,0	0,0	1,0	31,7	15,2
6,1–8,0	0,0	2,0	35,4	3,4
8,1–10,0	1,1	3,6	5,5	3,2
10,1–12,0	3,1	3,0	4,6	3,1
12,1–14,0	3,7	5,2	1,9	2,3
14,1–16,0	20,2	32,6	0,5	3,0
16,1–18,0	33,7	30,7	2,3	3,0
18,1–20,0	38,2	21,9	3,1	3,4

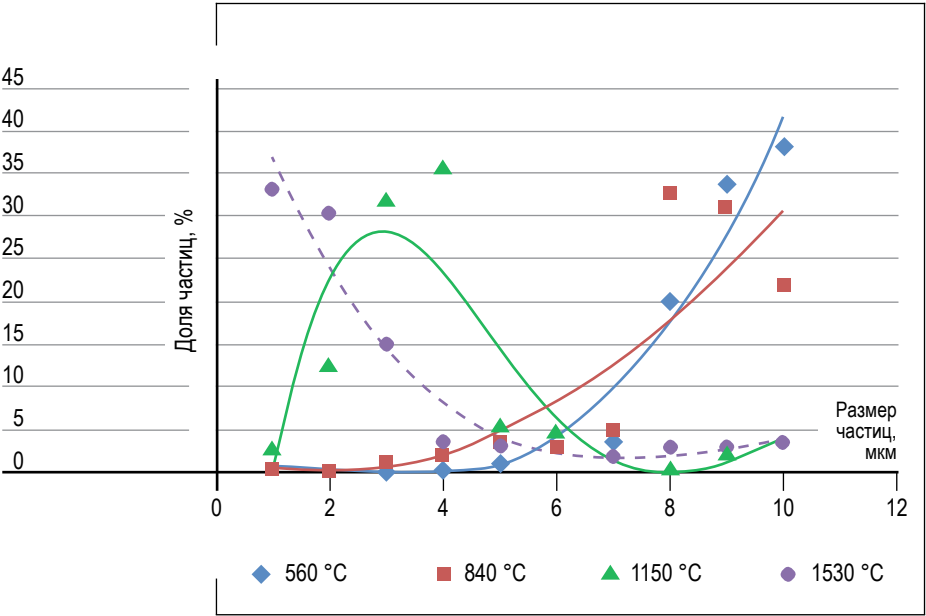


Рис. 8. Зависимость размеров кластеров из наночастиц оксида
цинка от температуры возгонки, %.
Fig. 8. Dependence of the size of clusters of zinc oxide nanopar-
ticles on the sublimation temperature, %.

Таблица 2. ЗАВИСИМОСТЬ РАЗМЕРОВ КЛАСТЕРОВ ИЗ НАНОЧАСТИЦ
ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗГОНКИ, %
Table 2. Dependence of the size of clusters of aluminum oxide
nanoparticles on the sublimation temperature, %

Размер, мкм	840 °C	1150 °C	1530 °C	1980 °C
0,1–2,0	0,0	0,0	0,0	8,6
2,1–4,0	0,0	0,0	0,5	28,1
4,1–6,0	0,0	0,9	2,7	33,5
6,1–8,0	0,0	1,3	7,5	6,5
8,1–10,0	0,0	2,2	17,5	4,4
10,1–12,0	1,1	5,7	20,2	3,3
12,1–14,0	7,9	5,6	32,7	1,6
14,1–16,0	29,0	18,0	9,5	3,6
16,1–18,0	32,6	36,0	6,4	5,0
18,1–20,0	29,4	30,3	3,0	5,4

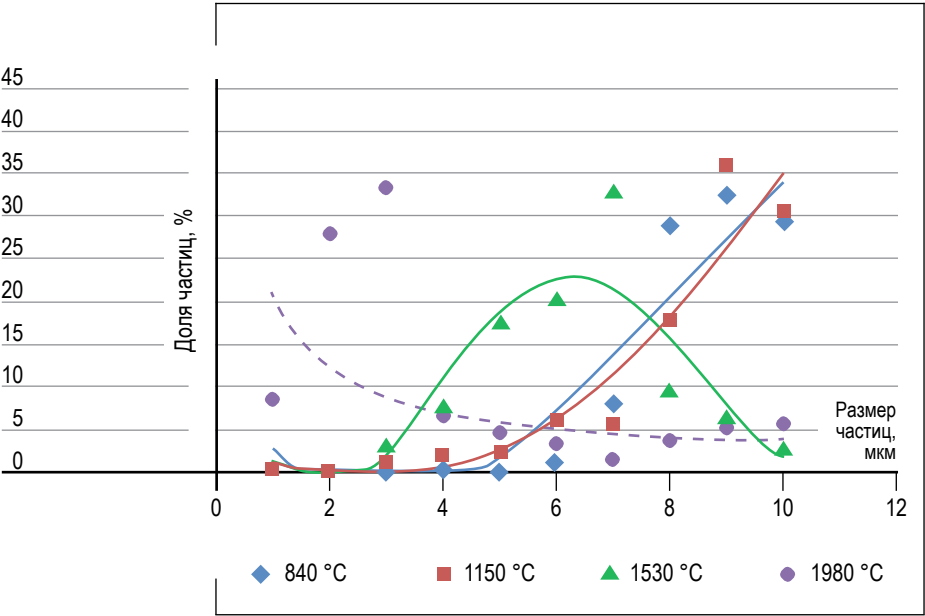


Рис. 9. Зависимость размеров кластеров из наночастиц оксида алюминия от температуры возгонки, %.
Fig. 9. Dependence of the size of clusters of aluminum oxide nanoparticles on the distillation temperature, %.

Таблица 3. УДЕЛЬНЫЙ ВЫХОД НАНОЧАСТИЦ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ
Table 3. Specific yield of metal oxide nanoparticles

Температура, °С	Цинка оксид, г ⁻¹	Алюминия оксид, г ⁻¹	АД-1, г ⁻¹
–3...–5	$7,0 \times 10^{12}$	$8,3 \times 10^{11}$	$2,7 \times 10^{12}$
–8...–9	$1,2 \times 10^{13}$	$3,1 \times 10^{12}$	$5,9 \times 10^{12}$

из наночастиц оксида цинка и оксида алюминия от температуры подложки.

Как видно из таблиц и рисунков, с увеличением температуры растет доля частиц малого диаметра в продуктах возгонки. Для оксида цинка кластеры из наночастиц размером до 2 мкм появляются при температуре возгонки более 1000 °С. Их количество резко возрастает при температуре около 1500 °С. В температурном диапазоне от 560 до 840 °С преобладают кластеры от 12 до 20 мкм. Кластеры оксида алюминия размером до 2 мкм появляются при температуре почти 2000 °С. При температуре около 1500 °С преобладают кластеры размерами от 8 до 14 мкм. Более крупные кластеры от 12 до 20 мкм отмечаются при температуре возгонки от 840 до 1150 °С. Это связано с тем, что несмотря на более низкую, чем у цинка температуру плавления и окисления, образующийся оксид алюминия более тугоплавкий материал и формирует частицы большего размера.

Лабораторные эксперименты по исследованию влияния размеров кластеров из наночастиц (нанотрубок) оксидов металлов на образование ледяной фазы показали, что оксиды металлов обладают льдообразующими свойствами (табл. 3).

Как видно из таблицы, оксиды цинка и алюминия обладают неплохими льдообразующими свойствами особенно в температурном диапазоне –8...–9 °С.

Наилучшие показатели у оксида цинка, удельный выход льдообразующих ядер в 2–3 больше, чем у штатного пиротехнического состава АД-1 и достигает значений 10^{13} г^{-1} (рис. 10).

**Рис. 10.**

Ледяные кристаллы, сформировавшиеся на кластерах оксида цинка.

Fig. 10. Ice crystals formed on zinc oxide clusters.

Заключение

Разработана комплексная аппаратура, позволяющая получать кластеры, состоящие из наночастиц оксида цинка и оксида алюминия в процессе возгонки в среде водяного пара. Исследован процесс формирования этих кластеров в зависимости от температуры подложки.

Эксперименты показали, что при высоких температурах (800–2000 °С) и в присутствии воды происходит возгонка металлов, в результате которой образуются кластеры, состоящие из плотно упакованных наночастиц – нитевидных нановолокон и нанотрубок. Когда эти кластеры попадают в облачную среду, они наполняются водой и приобретают льдоподобную структуру. Эта структура служит центром кристаллизации.

С повышением температуры в продуктах возгонки увеличивается количество частиц малого диаметра. В случае оксида цинка кластеры наночастиц размером до 2 мкм начинают формироваться при температуре выше 1000 °С, а их количество резко возрастает при температуре около 1500 °С. В температурном диапазоне от 560 до 840 °С преобладают кластеры размером от 12 до 20 мкм.

Кластеры оксида алюминия размером до 2 мкм появляются при температуре почти 2000 °С. При температуре около 1500 °С преобладают кластеры от 8 до 14 мкм. Более крупные кластеры от 12 до 20 мкм отмечаются в диапазоне температур возгонки от 840 до 1150 °С. Это связано с тем, что несмотря на более низкую температуру плавления и окисления по сравнению с цинком, температура возгонки алюминия выше.

Исследованы льдообразующие свойства кластеров из наночастиц оксида алюминия и оксида цинка. По данным экспериментов оксиды металлов обладают неплохими льдообразующими свойствами, особенно в температурном диапазоне –8...–9 °С. Для оксида цинка этот показатель составляет порядка 10^{13} частиц с 1 грамма. Оксид алюминия проявляет меньшую льдообразующую активность.

Результаты экспериментов показывают, что имеется принципиальная возможность и целесообразность использования кластеров из нановолокон оксидов металлов в качестве добавки к штатному пиротехническому составу или как самостоятельных льдообразующих реагентов.

Список источников

1. Хучунаев Б. М., Байсиев Х.-М. Х., Геккиева С. О., Будаев А. Х. Пиротехнический состав для воздействия на переохлажденные облака // Патент на изобретение RU 2714191 C1, 12.02.2020. Заявка № 2019125518 от 12.08.2019.
2. Fajardo C., Costa G., Ortiz L. T., Nande M., Rodríguez-Membibre M. L., Martín M., Sánchez-Fortún S. Potential risk of acute toxicity induced by AgI cloud seeding on soil and freshwater biota // *Ecotoxicol Environ Saf.* 2016. Vol. 133. P. 433–441. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.06.028>. Epub 2016 Aug 9. PMID: 27517140.
3. Ватиашвили М. Р. Оценка влияния на окружающую среду йодистого серебра, применяемого в противогодовой защите // *Наука. Инновации. Технологии.* 2018. № 2. С. 7–24.
4. Siddiqi K. S., Rahman A. U., Tajuddin, Husen A. Properties of Zinc Oxide Nanoparticles and Their Activity Against Microbes // *Nanoscale Res Lett.* 2018. Vol. 13(1). Art. No. 141. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2532-3>. PMID: 29740719; PMCID: PMC5940970.
5. Землянова М. А., Зайцева Н. В., Степанков М. С. Особенности токсического действия нано- и микрочастиц оксида алюминия при многократной ингаляционной экспозиции // *Гигиена и санитария.* 2023. № 102(5). С. 502–508. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-5-502-508>
6. Francis Arul Prakash, Dushendra Babu G. J., Lavanya M., Vidhya K. Shenbaga, Devasena T. Toxicity studies of aluminium oxide nanoparticles in cell lines // *International Journal of Nanotechnology and Applications.* 2011. No. 5. P. 99–107.
7. Лиев К. Б., Кущев С. А. Анализ экономической эффективности противогодовых работ в Российской Федерации // *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.* 2021. № 602. С. 124–133.
8. Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Барекова М. В., Малкарова А. М. Руководство по организации и проведению противогодовых работ. Нальчик: ВГИ, 2014. С. 314–318.
9. Колосков Б. П., Корнеев В. П., Щукин Г. Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. СПб: РГГМУ, 2012. 342 с.
10. Калов Х. М. Физические основы, методы и средства активных воздействий на грозо-градовые облака и туманы /

Х. М. Калов, Р. Х. Калов. Нальчик: Изд-во М. и В. Котляровых (Полиграфсервис и Т), 2010. 219 с.: ил., табл.: 22 см.; ISBN 978-5-93680-409-0.

11. Ким Н. С. и др. Пиротехнический состав для активного воздействия на переохлажденные облака и туманы / Н.С. Ким, А. Г. Шилин, В. С. Поносов, М. С. Резников, И. Н. Шакиров, П. А. Несмеянов, Б. Н. Дубинин, В. Н. Стасенко, В. П. Корнеев // Патент на изобретение RU 2309439 C1, 27.10.2007. Заявка № 2006121150/28 от 14.06.2006.
12. Agrawal K., Shimizu S., Drahushuk L. et al. Observation of extreme phase transition temperatures of water confined inside isolated carbon nanotubes // *Nature Nanotech.* 2017. No. 12. P. 267–273. <https://doi.org/10.1038/nnano.2016.254>
13. Pascal T. A., Goddard W. A., Jung Y. Entropy and the driving force for the filling of carbon nanotubes with water // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2011. Jul 19. No. 108(29). P. 11794–11798. <https://doi.org/1073/pnas.1108073108>. Epub 2011 Jun 27. PMID: 21709268; PMCID: PMC3141970.
14. Shayeganfar F, Beheshtian J., Shahsavari R. First-Principles Study of Water Nanotubes Captured Inside Carbon / Boron Nitride Nanotubes. *Langmuir.* 2018. No. 34(37). P. 11176–11187. Publication Date: August 23, 2018 <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b00856>
15. Хучунаев Б. М. и др. Экспериментальные исследования льдообразующей эффективности пиротехнического состава АД-1 с добавками цинка / Б.М. Хучунаев, Х.-М.Х. Байсиев, С.О. Геккиева, А.Х. Будаев // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2020. № 597. С. 51–60.
16. Kyakuno H., Matsuda K., Yahiro H., Inami Y., Fukuoka T., Miyata Y., Yanagi K., Maniwa Y., Kataura H., Saito T., Yumura M., Iijima S. Confined water inside single-walled carbon nanotubes: global phase diagram and effect of finite length // *J Chem Phys.* 2011. No. 134(24). P. 244–501. <https://doi.org/10.1063/1.3593064>. PMID: 21721637.
17. Мишенина Л. Н., Шелковников В. В. Справочные материалы по химии: учеб.-мет. пособие. 2-е изд., доп. и перераб. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. 89 с.

References

1. Khuchunaev BM, Baisiev K-MK, Gekkieva SO, Budaev AKh. Pyrotechnic composition for exposure to supercooled clouds. Patent for invention RU 2714191 C1, 02/12/2020. Application No. 2019125518 dated 08/12/2019. (In Russ.).
2. Fajardo C, Costa G, Ortiz LT, Nande M, Rodríguez-Membibre ML, Martín M, Sánchez-Fortún S. Potential risk of acute toxicity induced by AgI cloud seeding on soil and freshwater biota. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2016;133:433-441. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.06.028>. Epub 2016 Aug 9. PMID: 27517140.
3. Vatiashvili MR. Evaluation of the influence on the environment of argentum iodide applicable in anti-hail protection. *Science. Innovations. Technologies.* 2018;(2):7-24. (In Russ.).
4. Siddiqi KS, Rahman A. U., Tajuddin, Husen A. Properties of Zinc Oxide Nanoparticles and Their Activity Against Microbes. *Nanoscale Res Lett.* 2018;13(1):141. <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2532-3>. PMID: 29740719; PMCID: PMC5940970.
5. Zemlyanova MA., Zaitseva NV, Stepankov MS. Peculiarities of toxic effects produced by aluminum oxide nano- and microparticles under multiple inhalation exposure. *Gigiena i sanitayria = Hygiene and sanitation.* 2023;102(5): P. 502-508. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2023-102-5-502-508>. (In Russ.).
6. Francis Arul Prakash, Dushendra Babu GJ, Lavanya M, Vidhya K Shenbaga, Devasena T. Toxicity studies of aluminum oxide nanoparticles in cell lines. *International Journal of Nanotechnology and Applications.* 2011;(5):99-107.
7. Liev KB, Kushchev SA. Analysis of the economic efficiency of fire-fighting operations in the Russian Federation. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voeikova = Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov.* 2021;(602):124-133. (In Russ.).
8. Abshaev MT, Abshaev AM, Barekova MV, Malkarova AM. Guidelines for the organization and conduct of anti-hail works. *Nalchik: VGI;* 2014. P. 314-318. (In Russ.).
9. Koloskov BP, Korneev VP, Shchukin GG. Methods and means of modification of clouds, precipitation and fogs. *St. Petersburg: RSHMU;* 2012. 342 p. (In Russ.).

10. Kalov KM. Physical foundations, methods and means of active influence on hail-thunderstorm clouds and fogs. Ed. by Kalov KM, Kalov RK. Nalchik: Publishing house of M. and V. Kotlyarov (LLC Poligrafservis and T); 2010. 219 p.: ill., table: 22 cm.; ISBN 978-5-93680-409-0. (In Russ.).
11. Kim NS, Shilin AG, Ponosov VS, Reznikov MS, Shakirov IN, Nesmeyanov PA, Dubinin BN, Stasenko VN, Korneev VP. Pyrotechnic composition for active action on supercooled clouds and mists. Patent for invention ru 2309439 C1, 10/27/2007. Application No. 2006121150/28 dated 06/14/2006. (In Russ.).
12. Agrawal K, Shimizu S, Drahushuk L et al. Observation of extreme phase transition temperatures of water confined inside isolated carbon nanotubes. *Nature Nanotech.* 2017;12:267-273. <https://doi.org/10.1038/nnano.2016.254>
13. Pascal TA, Goddard WA, Jung Y. Entropy and the driving force for the filling of carbon nanotubes with water. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2011; 108(29):11794-11798. <https://doi.org/10.73/pnas.1108073108>. Epub 2011 Jun 27. PMID: 21709268; PMCID: PMC3141970.
14. Shayeganfar F, Beheshtian J, Shahsavari R. First-Principles Study of Water Nanotubes Captured Inside Carbon. Boron Nitride Nanotubes. *Langmuir.* 2018;34(37):11176-11187. Publication Date: August 23, 2018 <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b00856>
15. Khuchunaev BM, Baisiev K-MK., Gekkueva SO, Budaev AKh. Experimental studies of the ice-forming efficiency of the pyrotechnic composition of AD-1 with zinc additives. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voeikova* = Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after A.I. Voeikov. 2020;(597):51-60. (In Russ.).
16. Kyakuno H, Matsuda K, Yahiro H, Inami Y, Fukuoka T, Miyata Y, Yanagi K, Maniwa Y, Kataura H, Saito T, Yumura M, Iijima S. Confined water inside single-walled carbon nanotubes: global phase diagram and effect of finite length. *J Chem Phys.* 2011;134(24):244501. <https://doi.org/10.1063/1.3593064>. PMID: 21721637.
17. Mishenina LN, Shelkovnikov VV. Reference materials on chemistry: textbook-met. stipend. 2nd ed., additional and revised. Tomsk: Publishing House vol. Unita; 2007. 89 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Бузигит Муссаевич Хучунаев – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией микрофизики облаков Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 6504339248, Researcher ID: Z-5189-2019

Сафият Омаровна Геккиева – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник кафедры лаборатории микрофизики облаков Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 57214244669, Researcher ID: ABE-7367-2020

Алим Хадисович Будаев – младший научный сотрудник лаборатории микрофизики облаков Высокогорного геофизического института, Scopus ID: 57214244213, Researcher ID: Z-4534-2019

Вклад авторов

Бузигит Муссаевич Хучунаев. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Сафият Омаровна Геккиева. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

Алим Хадисович Будаев. Проведение исследования – проведение лабораторных исследований, интерпретация и анализ полученных данных, составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта.

Information about the authors

Buzigit M. Khuchunaev – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Head of Laboratory of Physics of Clouds of the High-Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 6504339248, Researcher ID: Z-5189-2019

Safiyat O. Gekkieva – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Research Associate of Laboratory of Physics of Clouds of the High-Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 57214244669, Researcher ID: ABE-7367-2020

Alim Kh. Budaev – Junior Research Associate of Laboratory of Physics of Clouds of the High-Mountain Geophysical Institute, Scopus ID: 57214244213, Researcher ID: Z-4534-2019

Contribution of the authors

Buzigit M. Khuchunaev. Conducting research – data collection, analysis and interpretation. Approval of the final manuscript – acceptance of responsibility for all types of the work, integrity of all parts of the paper and its final version.

Safiyat O. Gekkieva. Text preparation and editing – drafting of the manuscript and its final version, contribution to the scientific layout.

Alim Kh. Budaev. Conducting research – conducting laboratory tests, analysis and interpretation, drafting of the manuscript and its final version, approval of the final manuscript.

1. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ
1.6.21. Геоэкология (географические науки)



Научная статья
УДК 551.3 (470.65)
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.4>

**ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ УЧАСТКОВ
АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ ЧИКОЛА – МАЦУТА,
ПЕРЕСЕКАЮЩИХ КРУПНЫЕ
ОПОЛЗНЕВЫЕ МАССИВЫ
(Ирафский район,
Республика Северная Осетия – Алания)**

**Виктор Владимирович Разумов^{1*},
Наталья Дмитриевна Богданова²,
Наталья Викторовна Разумова³,
Наталия Владимировна Кондратьева⁴**

- ^{1,4} Высочайший геофизический институт Росгидромета (д. 2, пр. Ленина, Нальчик, 360030, Российская Федерация)
² Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве (д. 3, стр. 1, пер. Крапивинский, Москва, 127051, Российская Федерация)
³ Российские космические системы Роскосмоса (д. 53, ул. Авиамоторная, Москва, 111250, Российская Федерация)
¹ razumov_vv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8099-6976>
² bogdanova-nv@igiis.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3983-0373>
³ razumova-nv@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3266-7494>
⁴ kondratyeva_nat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7313-4489>
* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Объектом исследования является оползневая деятельность на автомобильной дороге Чикола – Мацута, проходящей по территории Ирафского района Республики Северная Осетия – Алания. В работе представлены результаты систематизации и анализа различных источников, содержащих информацию о местоположении и активности (за 2005–2023 гг.) крупных оползневых массивов, пересекаемых автодорогой Чикола – Мацута. В картографическом виде показано местоположение этих крупных оползней. Приведены некоторые качественные и количественные (площадь, объем, мощность) характеристики оползневых массивов, пересекаемых автодорогой, и дано краткое описание формирующих их грунтов. Проведен анализ произошедших наиболее значимых активизаций на этих оползнях за изученный период времени и выявлены участки автодороги, находящиеся в зоне их действия. Охарактеризованы основные природные и техногенные факторы, обуславливающие постоянную и периодическую активизацию изучаемых крупных оползней. Неодинаковая степень проявления этих факторов в разные годы обуславливает различную активность деформационных напряжений на изученных оползневых массивах и, соответственно, разную

степень поражения полотна дороги и дорожной инфраструктуры в зоне их влияния. За рассматриваемый период времени (2005-2023 гг.), для участков автодороги, находящихся в зоне действия изученных оползней, оценена степень их деформации (повреждения, разрушения) оползневыми массами и приведены количественные характеристики произошедшего ущерба. Анализ социально-экономических последствий выявленных, наиболее значимых активизаций оползневых массивов, пересекаемых автодорогой Чикола – Мацута, позволяет сделать вывод о довольно высокой степени их опасности для автомобильного движения по этой дороге.

Ключевые слова: оползневые массивы, оползни, активизация, автомобильная дорога, дорожное полотно, дорожная инфраструктура

Для цитирования: Разумов В. В., Богданова Н. Д., Разумова Н. В., Кондратьева Н. В. Оценка степени деформации участков автомобильной дороги «Чикола – Мацута», пересекающих крупные оползневые массивы (Ирафский район Республики Северная Осетия – Алания) // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 1. С. 89–116. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.4>

Конфликт интересов: доктор географических наук, профессор Виктор Владимирович Разумов является членом редакционной коллегии журнала «Наука. Инновации. Технологии». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

Статья поступила в редакцию 09.01.2025;
одобрена после рецензирования 10.03.2025;
принята к публикации 20.03.2025.

1.6.21. Geocology Research article

Assessment of the degree of deformation of sections of the Chikola – Matsuta highway crossing large landslide arrays (Irafsky district, Republic of North Ossetia – Alania)

**Viktor V. Razumov^{1*},
Natalia D. Bogdanova²,
Natalia V. Razumova³,
Nataliya V. Kondratyeva⁴**

^{1,4} High-Mountain Geophysical Institute of Roshydromet (Lenin Ave., 2, Na-
lichik, 360030, Russian Federation)

² Institute of Geotechnics and Engineering Surveys in Construction (3,
Bldg 1, Krapivenskiy lane, 127051, Russian Federation)

³ Russian Space Systems of Roscosmos (Aviamotornaya St., 53, Moscow, 111250, Russian Federation)

¹ razumov_vv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8099-6976>

² bogdanova@igiis.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3983-0373>

³ razumova-nv@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3266-7494>

⁴ kondratyeva_nat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7313-4489>

* Corresponding author

Abstract.

The object of the study is landslide activity on the Chikola-Matsuta highway passing through the territory of the Irafsky district of the Republic of North Ossetia-Alania. The paper presents the results of systematization and analysis of various sources containing information on the location and activity (for 2005-2023) of large landslide massifs crossed by the Chikola-Matsuta highway. The location of these large landslides is shown in a cartographic form. Some qualitative and quantitative (area, volume and capacity) characteristics of these landslide massifs intersected by the highway are given, and a brief description of the soils forming them is given. The analysis of the most significant activations on these landslides over the studied period of time has been carried out and the sections of the highway located in their area of action have been identified. The main natural and man-made factors that cause the constant and periodic activation of the studied landslides are characterized. The varying degree of manifestation of these factors in different years determines the diverse activity of deformation stresses on the studied landslide massifs and, accordingly, the different degree of damage to the roadbed and road infrastructure in the zone of their influence. During the time period under review (2005–2023), the degree of their deformation (damage, destruction) by landslide masses was estimated for the sections of the highway located in the area of the studied landslides and quantitative characteristics of the damage were given. An analysis of the socio-economic consequences of the identified, most significant landslide activations crossed by the Chikola-Matsuta highway allows us to conclude that they are quite dangerous for automobile traffic along this road.

Keywords: landslide arrays, landslides, activation, highway, roadway, road infrastructure

For citation: Razumov VV, Bogdanova ND, Razumova NV, Kondratyeva NV. Assessment of the degree of deformation of sections of the Chikola-Matsuta highway crossing large landslide arrays (Irafsky district, Republic of North Ossetia-Alania). *Science. Innovations. Technologies*. 2025;(1):89-116. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.4>

Conflict of interest: Viktor V. Razumov, Dr. Sci. (Geogr.), Professor, is a member of Editorial Board of journal "Science. Innovations. Technologies". The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this manuscript.

The article was submitted 09.01.2025;
approved after reviewing 10.03.2025;
accepted for publication 20.03.2025.

Введение

На территории Республики Северная Осетия – Алания (РСО–Алания) находится восемь административных районов (Алагирский, Ардонский, Дигорский, Ирафский, Кировский, Моздокский, Правобережный, Пригородный) и город республиканского подчинения – Владикавказ. Ирафский район расположен в юго-западной части РСО–Алания и граничит на юге – с Грузией, на западе и севере – с Кабардино-Балкарской Республикой, на востоке – с Дигорским и Алагирским районами республики. В состав района входит 36 населенных пунктов. Административным центром района является село Чикола, расположенное в междуречье рек Урух и Чикола, на высоте 670 м н.у.м. Единственной (действующей) автомобильной магистралью в Ирафском районе, соединяющей населенные пункты и базы отдыха, расположенные в высоко- и среднегорной зонах с остальной частью республики, является автодорога Чикола – Мацута, проходящая в долине реки (р.) Урух (левый приток р. Терек).

Река Урух является основной водной артерией района, она берет начало у ледника Харвес на склоне Главного Кавказского хребта. Современное оледенение в бассейне р. Урух развито на Главном и Боковом хребтах. Наличие ледников и высоких междуречных хребтов с крутыми склонами, обеспечивает высокий коэффициент стока. В геологическом строении долины р. Урух принимают участие осадочные, вулканогенные, магматогенные и метаморфогенные образования нижней и средней юры [1]. Сложное геолого-тектоническое строение бассейна реки обуславливает высокую активность оползневых процессов, которые представляют значительную угрозу населенным пунктам, хозяйственным и природным объектам Ирафского района республики.

Под оползнями, согласно СП 116.13330.2012 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003», понимается смещение горных пород со склонов, бортов карьеров, строительных выемок под действием веса грунта и объемных и поверхностных сил. Условия, причины образования и опасность проявления оползневых процессов общеизвестны и подробно описаны в научной литературе.

Всего в Ирафском районе республики зафиксировано 52 оползния [2], которые распространены как в высокогорных, так и в средне- и низкогорных частях бассейна р. Урух. Основная часть этих оползней в основном находится в стабильном состоянии, а 8–10 % – в стадии периодической активизации [3]. По объему оползни подразделяются на малые (до 1 тыс. м³), средние (от 1 до 10 тыс. м³), крупные (от 100 тыс. м³ до 1 млн м³) и очень крупные (более 1 млн м³) [2]. В небольшую группу крупных и очень крупных оползневых массивов Ирафского района можно отнести Арсакидонский, Донифарский, Мацутинский, Лесной, Калнахтинский, Нарские (Северный и Нижне-Нарский), Низовой, Верховой и др. [2, 4–6] (рис. 1). Местоположение и активность (в многолетнем разрезе) этих и других крупных оползневых массивов на территории республики РСО – Алания были нами ранее изучены и охарактеризованы в работах [7–11].

Многие участки автомобильных дорог РСО – Алания, в том числе и в Ирафском районе, вследствие геологических (мощный чехол рыхлых отложений на склонах, интенсивная тектоническая раздробленность скальных грунтов, неоднородность литологического состава и др.) и геоморфологических (высокий энергетический потенциал рельефа с крутыми и протяженными склонами, большие уклоны рек, морфология речных долин и др.) особенностей территории республики, подвержены оползневому процессам. Сейсмичность территории республики в совокупности с современными тектоническими движениями, очевидно, также способствует оползневой активизации на дорогах [2]. Многочисленные публикации [2, 6–12] свидетельствуют о том, что в республике наиболее активно оползневые процессы проявляются на тех участках автомобильных дорог, которые проходят по телу крупных оползневых массивов.

Цель исследования – оценить степень деформации (повреждения, разрушения) участков автомобильной дороги Чикола – Мацута (Ирафский район Республики Северная Осетия – Алания), проходящих по телу крупных оползневых массивов.

Основные задачи исследования:

- провести инвентаризацию и описание крупных оползней, в зоне действия которых проходит автодорога Чикола – Мацута;



Рис. 1.

Карта местоположения основных оползневых массивов в бассейне р. Урух [11].

Fig. 1. The map of the location of the main landslide massifs in the Uruk River basin [11].

Источник: [11]. Source: [11].

- оценить степень деформации участков автодороги в результате активизации этих оползневых массивов (за период 2005–2023 г.).

Материалы и методы исследований

Главным методом, используемым в данной работе, стал анализ различных источников, содержащих информацию об активности крупных оползневых массивов на территории Ирафского района РСО–Алания. В качестве основных были использованы литературные источники и опубликованные данные Минприроды РСО–Алания [3, 13] и Центра государственного мониторинга состояния недр (ГМСН) ФГБУ «Гидроспецгеология» [14–19]. Обобщение и систематизация собранного материала с единых методических позиций позволили достаточно достоверно оценить степень деформации отдельных участков автодороги Чикола – Мацута (за период 2005–2023 г.), находящихся в зоне активизации крупных оползневых массивов.

В исследовании дополнительно были использованы следующие фондовые материалы (далее – отчеты):

- отчет по «Ведению государственного мониторинга состояния недр территории Республики Северная Осетия – Алания» в 2005-2007 гг.». Книга 1 (ГУП РСО–А РЦ «Севосгеомониторинг», Владикавказ, 2007);
- отчет о результатах работ по объекту 6-06/07 «Ведение государственного мониторинга состояния недр территории Южного федерального округа в 2008–2010 гг.». Книга 1, 2 (ЮРЦ ГМСН ФГУГП «Гидроспецгеология», Ессентуки, 2011);
- геологический отчет по объекту «Государственный мониторинг состояния недр территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов в 2011–2013 гг.». Книга 1, 2 (ЮРЦ ГМСН ФГБУ «Гидроспецгеология», Ессентуки, 2013);
- геологический отчет о результатах выполненных работ по объекту «Государственный мониторинг со-

стояния недр территории Северо-Кавказского ФО в 2014-2015 гг.». Книга 1, 2 (ЮРЦ ГМСН ФГБУ «Гидро-роеспецгеология», Ессентуки, 2015).

Для указания местоположения, произошедших на автодороге активизаций оползневых массивов, использовались значения километрового знака (пикета), обозначающего (согласно ГОСТ 32869-2014) нумерованную точку разметки расстояния на дороге (отрезок дороги между смежными пикетными знаками равен 100 м).

Результаты исследований и их обсуждение

Одним из основных изменяющихся факторов активизации оползневых процессов в долине р. Урух является гидрометеорологический. Избыточное увлажнение склонов чаще всего достигается совокупным действием обильных дождей и интенсивным таянием ледников и снежников в высокогорных частях бассейна. В годы аномально сильных осадков число оползневых активизаций увеличивается в 2,5–3,0 раза [11, 20]. Значительное влияние на активность оползней оказывает резкое увеличение стока р. Урух, в результате чего происходит размыв и разрушение фронтальных частей оползней. Боковая эрозия реки вызывает постепенное смещение центра тяжести оползневых масс и нарушение их равновесия, что является одним из наиболее существенных факторов их сохраняющейся активности [3, 13].

Эксплуатация и периодическая реконструкция автодороги Чикола – Мацута (с нарушением подземного и поверхностного стока, подрезкой и отсыпкой горных склонов, динамическими вибрациями от движущегося автотранспорта и др.) также значительно провоцирует активизацию оползневых массивов, расположенных вблизи дороги и пересекаемых ею. Оползневые активизации на этой дороге неоднократно приводили к деформации ее полотна и инфраструктурных объектов, в основном, на участках ее перехода через крупные оползневые массивы: Арсакидонский, Тоннельный, Верховой, Низовой, Лесной, Мацутинский, Нарские (Северный и Нижне-Нарский) и др. (рис. 1). Приведем результаты проведенного анализа по

оценке степени деформации участков автодороги «Чикола – Мацута» в зоне активизации этих оползней.

Автодорога Чикола – Мацута на 13,2–14,0 км пересекает *Арсакидонский оползень*, расположенный на правом берегу р. Урух (в 2 км к югу от села (с.) Ахсарисар). Базисом оползания является пойма р. Арсакидон (правый приток р. Урух) (высота – 820 м н.у.м.). Оползень развивается в делювиальных и аллювиальных отложениях, представленных валунно-галечниками с суглинком. Практически ежегодно в теплый период года оползневой массив находится в стадии активного развития (вследствие сильного обводнения грунтов после снеготаяния и весенних ливней), зимой он обычно переходит в стадию временной стабилизации. Значимые активизации на оползне происходили в 2016, 2017, 2019 и 2020 гг. [8, 11]. Наиболее значительные подвижки на оползне, приведшие к деформации до 200 м дорожного полотна и временной остановки движения произошли в 2016 г. Активизация оползня (площадь – 3,5 тыс. м², мощность – 5–10 м) в весенне-летний период 2017 г. привела к повреждению около 100 м дороги. В марте-апреле 2019 г. создалась угроза перекрытия дороги в результате подвижек на оползне (площадь – 2,8 тыс. м², мощность – до 10 м, объем – 20 тыс. м³). При последней активизации (площадь активной части – 7,2 тыс. м², мощность – до 8 м) оползневого массива (в 2020 г.) было деформировано 50 м дорожного полотна.

В 100 м к югу от автодорожного тоннеля, в низовом откосе автодороги (пикет 21,1 км), расположен *Тоннельный оползень*. Значительные подвижки на оползне, с деформацией до 50 м дорожного полотна, наблюдались только в последние годы (2019, 2021–2023 гг.) [11, 14–19]. В 2019 г., результатом ранней весенней активизации (площадь – 2,5 тыс. м², мощность – до 5 м, объем – 10 тыс. м³) оползня, явилось отседание 50 м дорожной полки и низового откоса дороги. В апреле 2021 г., активизация (площадь активной части – 3,5 тыс. м², мощность – до 10 м) оползня, обусловленная пригрузкой больших объемов техногенных грунтов на внешний край дорожной полки, привела к деформированию 50 м дорожного полотна. По 50 м дороги было повреждено в 2022 и 2023 гг., при этом площадь активизации составила, соответственно, 3,5 тыс. м² и 4,0 тыс. м².

В 0,5 км к западу от с. Нижний Задалеск (на правом берегу р. Урух) в верховом откосе автодороги (пикет 27,5-27,6 км) расположен **Верховой оползень**, развивающийся в глинистых древнеоползневых отложениях. В последние годы, после активного снеготаяния и выпадения атмосферных осадков, на нем наблюдались активные подвижки и трещины, которые приводили в 2017-2020 гг. к деформации до 50 м полотна и 20 м силового ограждения дороги [8, 11]. Так, в начале весны 2017 г. смещение части (площадь – 3,5 тыс. м², мощность – 3-5 м, объем – 10,0 тыс. м³) оползня привело к повреждению 40 м дорожного полотна и 20 м силового ограждения дороги. Значительные подвижки на оползне (площадь активной части – около 3,5 тыс. м², объем – 15–20 тыс. м³, мощность – до 5 м) наблюдались в апреле 2018 г., в результате чего было перекрыто грунтовыми массами 50 м дороги (рис. 2). Медленное оползание разжиженных грунтов на дорогу продолжалось около 3 суток, что потребовало постоянного присутствия дежурной дорожной техники.

В конце марта – начале апреля 2019 г. на оползне наблюдалась деформация поверхности склона, просадка центральной части, оползание разжиженных глинистых масс по склону вплоть до дороги, но дорожное полотно не было затронуто. Площадь активной части оползня составила 1,5 тыс. м², мощность – до 5 м, объем – около 7 тыс. м³. В апреле 2020 г. полужидкими оползшими грунтами (площадь активизации – 3,2 тыс. м²) было перекрыто 40 м автодороги.

Значительную угрозу автодороге (пикет 28,1 км) представляет **Лесной оползень** (объем – около 4,5 млн м³), расположенный на правом берегу р. Урух. Его активизация в значительной степени обусловлена практически ежегодной активностью (последние 15-20 лет) Донифарского оползня (площадь – 560 тыс. м², объем – до 15 млн м³, мощность – 70 м) расположенного (рис. 3) на склоне (крутизна 10–12°) левого берега р. Урух, к северу от с. Донифарс, напротив Лесного оползня. Смещение значительных масс грунтов Донифарского оползневого массива при его активизации в русло р. Урух приводит к оттеснению реки к правому берегу, что приводит к усилению эрозии фронтальной части Лесного оползня. На теле Лесного оползня при этом наблюдается отсадка крупных блоков, рас-



Рис. 2.

Фронтальная часть Верхового оползня после расчистки а/д Чикола – Мацута (пикет 27,6 км), 2018 г. Фото АО «Севосетингеоэкомониторинг».

Fig. 2. The frontal part of the Riding landslide after the clearing of the Chikola – Matsuta highway (picket 27.6 km), 2018. Photo by JSC Sevosingeoekomonitoring.

Источник:
Source:

Фото АО «Севосетингеоэкомониторинг».
Photo by JSC Sevosingeoekomonitoring.

трескивание поверхности, обводнение и разжижение грунтов, что вызывает отсадку и оползание низового откоса автодороги Чиколла – Мацута на протяжении более 100 м. Наиболее крупная активизация Лесного оползня была отмечена в 1991 г., после чего он 15 лет находился в стадии временной стабилизации. В XXI веке наиболее значимые активизации на этом оползневом массиве (с деформированием до 100 м дорожной полки) происходили в 2005, 2006, 2009, 2011, 2012, 2020, 2021 гг. [8, 11, 14–19]. Весной 2005–2006 гг. в пределах фронтальной части оползня, размываемой р. Урух, происходило интенсивное растрескивание склона, отсадка и оползание крупных блоков в низовом откосе автодороги. В 2009 г. смещение значительных масс грунтов Донифарского оползня привело к отеснению реки к правому берегу, где усилилась эрозия фронтальной части Лесного оползня, что стало причиной оползания низового откоса автодороги, деформации захватили 100 м дорожной полки (рис. 4).

В 2011 г. такая же активизация Лесного оползня привела к повреждению 200 м дороги, а в 2012 г. – 20 м. В середине мая 2020 г., в низовом откосе автодороги произошло оползание крупного обводненного блока (площадь – 3,5 тыс. м², мощность – до 6 м) южного фланга Лесного оползня, который деформировал 50 м внешнего края дорожной полки. В апреле 2021 г. при активизации (площадь – 4,0 тыс. м², мощность – до 6 м) фронтальной части оползня наблюдалась отсадка крупных блоков, растрескивание поверхности, обводнение и разжижение грунтов. При активизации было деформировано 40 м дорожной полки.

На 28,3–29,0 км автодорога пересекает *Низовой оползень*, расположенный на правом берегу р. Урух, в 0,8 км к юго-западу от с. Нижний Задалеск. Базисом его оползания является пойма р. Урух (высота – около 1000 м н.у.м.), а промежуточным базисом – ступень древнего оползня (высота – 1065 м н.у.м.). Низовой оползень развился в старых оползневых отложениях с захватом современных делювиально-пролювиальных грунтов. Кроме весеннего обводнения грунтов осадками, на снижение устойчивости склона здесь повлияла сильная подрезка дорожной выемкой, в результате чего был нарушен естественный устоявшийся сток грунтовых вод и заметно увеличилось обводнение грунтов. Значимая активность на оползне, с



Рис. 3.

**Донифарский оползень.
Общий вид, 2019 г.**

Fig. 3. Donifars landslide. General view, 2019.

Источник:
Source:

Фото АО «Севосетингеоэкомониторинг».
Photo by JSC Sevosetingeoeкомониторинг.



Рис. 4.

Развитие деформационных процессов на пересечении а/д «Чикола – Мацута» с Лесным оползнем, 2009 г.

Fig. 4. Development of deformation processes at the intersection of the Chikola-Matsuta highway with the Lesnoy landslide, 2009.

Источник:

Фото ГУП РСО – А «Севосгеоэкомониторинг».

Source:

Photo by the State Unitary Enterprise of the Republic of North Ossetia – Alania Sevosgeoeocomonitoring.



Рис. 5.

Смещенные блоки в головной и центральной частях Низового оползня в месте его пересечения а/д Чикола – Мацута (пикет 29,0 км), 2017 г.

Fig. 5. Displaced blocks in the head and central parts of the Lower Landslide at the place where it intersects the Chikola-Matsuta highway (piquet 29.0 km), 2017.

Источник:
Source:

Фото АО «Севосетингеоэкомониторинг».
Photo by JSC Sevosetingeoeocomonitoring.

деформацией до 150 м дорожного полотна и до 100 м дорожной инфраструктуры, наблюдалась в 2016–2023 гг. [8, 11, 14–19]. В 2016 г., в результате активизации оползня было повреждено 60 м дорожного полотна. В конце апреля 2017 г., при активизации части оползня (площадь – 2,7 тыс. м², объем – 19–20 тыс. м³, мощность – до 10 м) наблюдалось смещение блоков грунта на дорожное полотно и оползание низового откоса дороги с растрескиванием и разрушением асфальтового покрытия, в результате чего было деформировано 50 м дорожного полотна и 20 м силового ограждения (рис. 5).

При подвижках (площадь – 22,5 тыс. м², мощность – 5–7 м) оползня в марте 2018 г. наблюдалось оползание крупных блоков грунта на полотно дороги и отседание низового откоса дороги, было деформировано 100 м дорожного полотна. В первых числах апреля 2019 г., при активизации оползня (площадь – 22 тыс. м², мощность – до 10 м, объем – 200 тыс. м³), грунтовыми массами было перекрыто 100 м дороги. В апреле 2020 г., в этом же месте возобновились активные подвижки на оползне (площадь активной части – 95 тыс. м², мощность – до 10 м), что привело к повреждению 150 м дорожного полотна. В апреле 2021 г. наблюдалось растрескивание дорожного полотна, отсадка низового откоса дороги (до 2,5 м) и обрушение металлического ограждения на интервале 100 м. В апреле 2022 г., активизация (площадь активной части – 19,5 тыс. м², мощность до 10 м) оползня привела к деформации 150 м дорожной полки и металлического ограждения. В мае 2023 г. очередная активизация оползня привела к деформированию 100 м дорожной полки.

Наиболее разрушительные деформации автодороги Чикола – Мацута происходили на участке, где она пересекает фронтальную часть *Мацутинского оползня* (пикет 29,5–30,0 км), расположенного на правом берегу р. Урух (в 1,5 км к северу от с. Мацута). Грунты этого оползневого массива (протяженность – 1,2 км, объем – около 15,5 млн м³, площадь – 0,4 км², мощность – 30–50 м, крутизна склона – до 30°) представлены щебнисто-глинистым материалом с глыбами и блоками осадочных пород [5, 7]. Оползень сохраняет постоянную активность с 1990 г. Обводнение грунтов здесь вызывает периодическое смещение оползневых масс на площади до 200 тыс. м² с разрушением автодороги на интервале до 400 м и более. Со време-

ни своего образования Мацутинский оползень сохраняет постоянную активность за счет подмыва рекой Урух фронтального уступа, техногенной подрезки склона и ливневых осадков. Наиболее значимая активность этого оползневого массива наблюдалась в 2007-2009, 2011, 2014, 2017, 2018 гг. [8, 11]. Так, в 2007 г. формирование крупного оползневого блока (площадь – около 15 тыс. м²) на южном фланге Мацутинского оползня, создало реальную угрозу разрушения дорожного полотна протяженностью около 100 м. В 2008 г., на этом же месте, наблюдалась интенсивная деформация полотна автодороги, в виде отсадки и обрушения наружного края 100 м дорожной полки. Отдельные блоки осели по вертикали на 1,5–2 м. В 2009 г. интенсивные деформации на южном фланге оползня вызвали оползание низового откоса и дорожной полки на протяжении более 200 м. В 2011 г. трещина отрыва оползневого блока наблюдалась выше дороги, охватывая участок дорожной полки общей протяженностью до 200 м. Активизация на оползне с марта по август 2014 г. привела к повреждению 100 м дороги. В марте–апреле 2017 г. подвижки (площадь – около 90 тыс. м², объем – 200 тыс. м³, мощность – 25 м) на фронтальной части оползня привели к деформированию 100 м дороги. В марте 2018 г., в результате очередной активизации оползня (площадь активной части – 100 тыс. м²) было деформированию 300 м автодороги. Катастрофическая активизация Мацутинского оползня (площадь активной части – 157,5 тыс. м², объем – более 6 млн м³, мощность – 40–50 м), произошедшая 3–7 августа 2018 г. привела к сильным деформациям и смещению крупных блоков грунта как на самом оползне, так и на пересекающей его автодороге «Чиколла – Мацута». Средняя скорость смещения оползня составляла в среднем 3,5 м/сут. Всего было разрушено около 500 м дороги, дорожное полотно в некоторых местах сместилось вниз на 20 м (рис. 6).

На 30,1–30,2 км автодорога пересекает **Северный Нарский оползень**, расположенный на правом берегу р. Урух (между Мацутинским и Нижне-Нарским оползнями). Оползневой массив находится на крутом (до 45°) склоне, значительно превышающем угол естественного откоса для щебнисто-глинистых пород. Последние 15-20 лет, пребывая в стадии относительной стабилизации (на по-



Рис. 6. Смещение полотна автодороги Чикола – Мацута в результате активизации Мацутинского оползня, 07.08.2018.

Источник:
Source:

Fig. 6. Displacement of the Chikola-Matsuta roadbed as a result of the activation of the Matsuta landslide, 07.08.2018.
Фото АО «Севосетингеозомониторинг».
Photo by JSC Sevosetingeoeomonitoring.



Рис. 7.

Северный Нарский оползень, подрезанный а/д Чикола – Мацута, 2008 г.

Fig. 7. Severniy Narskiy landslide undercut by Chikola – Matsuta highway, 2008. Photo by Sevosgeoekomonitoring.

Источник:

Фото ГУП РСО – А «Севосгеоэкомониторинг».

Source:

Photo by Sevosgeoekomonitoring.

верхности оползня находятся неустойчивые глыбы весом в десятки тонн, создающие дополнительную угрозу дорожному движению), он несколько раз выводил из строя до 100 м автодороги. Наиболее значимые активизации на оползне наблюдались в 2008, 2015 и 2019 гг. [8, 11]. В 2008 г. активные подвижки (площадь – 39 тыс. м²) на оползне привели к деформированию 100 м автодороги (рис. 7), а в 2015 г. оползневыми массами было перекрыто 30 м дорожного полотна. При активизации (площадь активной части – 2,75 тыс. м², мощность – до 10 м, объем – до 270 тыс. м³) оползня в апреле 2019 г., полотно дороги частично перекрывалось оползшими грунтами.

Автодорога Чикола – Мацута (пикет 30,4-31,0 км) также проходит и по телу *Нижне-Нарского оползня* (площадь 0,74 км², объем 25,0 млн м³), расположенного на правом берегу р. Урух (в 0,5 км севернее с. Мацута). Состав грунтов этого оползневого массива характеризуется преобладанием щебнистого материала, но в головной и средней его части фрагментарно встречаются глинистые участки. В средней и нижней части тело оползневого массива обводнено, отмечен ряд постоянных и сезонных родников и заболоченных участков. Основная причина активизации этого оползня состоит в том, что при реконструкции дороги оползневый склон был подрезан дорожной выемкой, а верховой откос приобрел высоту 20–40 м и крутизну до 60–70°, что резко снизило его устойчивость и сильно нарушило устоявшийся сток грунтовых вод. Это вызвало обводнение отдельных участков нагорного склона и также способствовало активизации оползня. Последняя крупная активизация оползня была в 1993 году. В XXI веке значимая активность на оползне, с деформацией и перекрытием до 200 м автодороги, наблюдалась в 2009–2011, 2014, 2015, 2018–2022 гг. [8, 11, 14–19]. Она происходила преимущественно в пределах фронтальной части оползня, через которую проходит автодорога, этот участок приходилось ежегодно расчищать от грунтовых масс и ремонтировать.

В 2009 г. при активизации (площадь – 10 тыс. м²) северного фланга Нижне-Нарского оползня, оползневыми массами было перекрыто 70 м автодороги (в 500 м севернее с. Мацута). В марте-апреле 2010 г. в результате активизации оползня произошла деформа-

ция 200 м дороги (пикет 30,4 км). В 2011 г. активизировался южный фланг оползневого массива (пикеты 30,6–31,0 км), создавая периодическое перекрытие и деформацию дорожной полки на протяжении 200 м, причем интенсивное развитие деформаций шло как в низовом откосе, так и в нагорном склоне дороги. Происходящие активизации на оползне в марте-августе 2014 и 2015 гг. привели к ежегодному повреждению 50 м дорожного полотна. В апреле 2018 г. произошло отседание и оползание на дорожную полку грунтовых масс с верхового откоса дороги на северном фланге Нижне-Нарского оползня, что привело к перекрытию оползневыми отложениями 40 м автодороги. В марте 2019 г. произошла активизация (площадь – 5,0 тыс. м², мощность – до 10 м, объем – 50,0 тыс. м³) фронтальной части южного фланга оползня, в результате чего 10 м верхнего края дорожной полки было разрушено вместе с асфальтом. Оползневые массы перекрыли водопропускной лоток по нагорному краю дороги. В начале апреля этого же года активизировался (площадь – 3,5 тыс. м², мощность – до 2 м, объем – 5 тыс. м³) северный блок оползня, следствием чего явилось перекрытие оползневыми массами 40 м автодороги. В мае 2020 г. произошла активизация (площадь – 5 тыс. м², мощность – до 10 м, объем – 50 тыс. м³) южного блока оползня, в результате чего было деформировано 10 м внешнего края дороги (пикет 30,6 км). В апреле 2021 г. выявлена активизация на южном и северном флангах Нижне-Нарского оползня. В результате активизации (площадь – 5 тыс. м², объем – около 50 тыс. м³, мощность – до 10 м) на южном блоке оползня, было деформировано 10 м дороги. При активизации на северном блоке отмечалось обрушение и сползание рыхлого материала на дорожное полотно при сильном обводнении и разжижении, в результате чего было перекрыто 40 м дороги. В 2022 г., также, как и в предыдущем, активизация произошла на южном и северном блоках оползня. На южном блоке активизация (площадь – 5 тыс. м², объем – около 50 тыс. м³, мощность – до 10 м) проявилась в виде растрескивания склона, смещения отдельных блоков при обводнении, осыпании и оползании рыхлого материала на дорогу. При активизации (площадь – 3,5 тыс. м², мощность 2–3 м) северного блока произошло перекрытие 40 м дороги оползневыми массами.

Заключение

Проведенные систематизация и анализ различных источников, содержащих информацию о распространении и активности (за 2005–2023 гг.) наиболее крупных оползневых массивов на территории Ирафского района Республики Северная Осетия – Алания, позволили выявить те из них, в зоне действия которых находится автомобильная дорога Чикола – Мацута. В картографическом виде показано местоположение крупных оползней на территории района. Приведены некоторые качественные и количественные (площадь, объем, мощность) характеристики крупных оползневых массивов, пересекаемых автодорогой. Проведен анализ произошедших активизаций на этих оползнях за изученный период времени и выявлены участки автодороги, находящиеся в зоне их действия. Охарактеризованы основные природные и техногенные факторы, обуславливающие постоянную и периодическую активизацию изучаемых оползней. Неодинаковая степень проявления этих факторов в разные годы обуславливает различную активность деформационных напряжений на изученных оползневых массивах и, соответственно, разную степень поражения дорожной инфраструктуры в зоне их влияния. За рассматриваемый период времени (2005–2023 гг.), для участков автодороги, находящихся в зоне действия изученных оползней, оценена угроза их деформации (повреждения, разрушения) оползневыми массами и приведены количественные характеристики произошедшего ущерба. Анализ социально-экономических последствий выявленных, наиболее значимых активизаций оползневых массивов, пересекаемых автодорогой Чикола – Мацута, позволяет сделать вывод о довольно высокой степени их опасности для автомобильного движения по этой дороге.

Список источников

1. Кюль Е. В. Тектонические оползневые массивы Центрального Кавказа // Геология и геофизика Юга России. 2017. № 2. С. 67–81.
2. Томаев В. А., Хацаева Ф. М. Развитие оползней в зонах палеосейсмодислокаций горных территорий РСО–Алания // Устойчивое развитие горных территорий в условиях глобальных изменений. Материалы VII Международной конференции, Владикавказ, 2010. С. 14–18.

3. Государственные доклады о состоянии и об охране окружающей среды и природных ресурсов Республики Северная Осетия – Алания в 2002–2017 гг. Владикавказ: Министерство природных ресурсов и экологии Республики Северная Осетия – Алания, 2003–2018.
4. Схема территориального планирования Ирафского муниципального района. Материалы по обоснованию. Т. 1. Анализ современного положения. Природно-ресурсный потенциал. Владикавказ: Инфотерра, 2011. 150 с.
5. Хацаева Ф. М., Томаев В. А. Оползневая опасность бассейнов горных рек Республики Северная Осетия – Алания // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–2. С. 1821.
6. Цгоев Т. Ф., Гриднев Е. А. Мониторинг экзогенных геологических процессов на территории РСО–Алания: состояние, проблемы и меры по их предотвращению // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2015. № 3 (13). С. 56–61.
7. Богданова Н. Д., Разумов В. В., Висхаджиева К. С., Разумова Н. В. Активность основных оползневых массивов в бассейне р. Урух (Республика Северная Осетия – Алания) // Инженерные изыскания. 2019. № 5–6. С. 76–87.
8. Разумов В. В., Аджиев А. Х., Разумова Н. В., Кондратьева Н. В., Богданова Н. Д. База данных оползневых активизаций, произошедших на территории Республики Северная Осетия – Алания за 2005–2020 гг. / Заявка № 2022621563 от 29.06.2022 г. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022622742 от 03.11.2022 г.
9. Разумов В. В., Богданова Н. Д., Разумова Н. В., Висхаджиева К. С., Князев А. П. Активность основных оползневых массивов в бассейнах рр. Урсдон и Ардон (Республики Северная Осетия – Алания) // Инженерные изыскания. 2020. Том XIV. № 2. С. 10–26.
10. Разумов В. В., Богданова Н. Д., Разумова Н. В., Шальнев В. А. Опасность оползневой деятельности в Моздокском районе Республики Северная Осетия – Алания // Наука. Инновации. Технологии. 2024. № 2. С. 141–164.
11. Разумов В. В., Лиховид А. А., Шаповалов Д. А., Шагин С. И., Разумова Н. В., Богданова Н. Д. Оползневая деятельность на Северном Кавказе в XXI веке / под ред. д.г.н., проф. В.В. Разумова. М.: Феория; Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2022. 368 с.

12. Хацаева Ф. М., Томаев В. А. Оползневые процессы в тектонически-активных зонах территории РСО–Алания // Природные ресурсы республики Северная Осетия – Алания. Том «Природные и техногенные катастрофы». Владикавказ, 2005. С. 74–81.
13. Доклады об экологической ситуации в Республике Северная Осетия – Алания в 2016–2019 гг. Владикавказ: Министерство природных ресурсов и экологии Республики Северная Осетия – Алания. 2017–2020.
14. Информационные бюллетени о состоянии недр на территории Российской Федерации в 2004–2022 гг. М.: Изд-во «Геоинформмарк», 2005–2023. Вып. 28–46.
15. Информационные бюллетени о состоянии недр территории Северо-Кавказского федерального округа Российской Федерации за 2015–2023 гг. Ессентуки: Изд-во «Гидроспецгеология», 2016–2024. Вып. 12–20.
16. Информационные сводки о проявлениях экзогенных геологических процессов на территории Российской Федерации (по кварталам) за 2007–2023 гг. М.: Изд-во «Гидроспецгеология», 2007–2023.
17. Информационные сводки о проявлениях экзогенных геологических процессов на территории Южного федерального округа (по кварталам) за 2005–2010 гг. Ессентуки: Изд-во «Гидроспецгеология», 2005–2010.
18. Информационные сводки о проявлениях экзогенных геологических процессов на территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов (по кварталам) за 2011–2012 гг. Ессентуки: Изд-во «Гидроспецгеология», 2011–2012.
19. Информационные сводки о проявлениях экзогенных геологических процессов на территории Северо-Кавказского федерального округа (по кварталам) за 2013–2023 гг. Ессентуки: Изд-во «Гидроспецгеология», 2013–2023.
20. Цогоев В. Б. Геология и полезные ископаемые. Владикавказ: Проект-Пресс. 2005. 390 с.

References

1. Kühl EV. Tectonic landslide massifs of the Central Caucasus. Geology and Geophysics of the South of Russia. 2017;(2):67-81. (In Russ.).
2. Tomaev VA, Khatsaeva FM. Development of landslides in zones of paleoseismic dislocations of mountainous territories

- of the Republic of North Ossetia-Alania. Sustainable development of mountainous territories in the context of global changes. Proceedings of the VII International Conference; Vladikavkaz; 2010;14-18. (In Russ.).
3. State reports on the state and protection of the environment and natural resources of the Republic of North Ossetia-Alania in 2002-2017. Vladikavkaz: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Republic of North Ossetia – Alania; 2003-2018. (In Russ.).
 4. Territorial planning scheme of the Irafsky municipal district. Materials for justification. Volume 1. Analysis of the current situation. Natural resource potential. Vladikavkaz: LLC NPP Infoterra; 2011. 150 p. (In Russ.)
 5. Khatsayeva FM, Tomaev VA. Landslide hazard of mountain river basins of the Republic of North Ossetia-Alania. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Modern problems of science and education. 2015;(1-2):1821. (In Russ.).
 6. Tsgoev TF, Gridnev EA. Monitoring of exogenous geological processes in the territory of the Republic of North Ossetia – Alania: status, problems and measures to prevent them. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* = Engineering and construction bulletin of the Caspian region. 2015;3(13):56-61. (In Russ.).
 7. Bogdanova ND, Razumov VV, Viskhadzhieva KS, Razumova NV. Activity of the Main Landslide Massifs in the Uruk River Basin (Republic of North Ossetia-Alania). *Inzhenernye izyskaniya* = Engineering Surveys. 2019;(5-6):76-87. (In Russ.).
 8. Razumov VV, Adzhiev AKh, Razumova NV, Kondratieva NV, et. al. Database of Landslide Activations That Occurred on the Territory of the Republic of North Ossetia-Alania in 2005-2020. Application No. 2022621563 dated June 29, 2022. Certificate of state registration of the database No. 2022622742 dated November 3, 2022. (In Russ.).
 9. Razumov VV, Bogdanova ND, Razumova NV, Viskhadzhieva KS, Knyazev AP. Activity of the main landslide massifs in the Ursdon and Ardon river basins (Republic of North Ossetia-Alania). *Inzhenernye izyskaniya* = Engineering surveys. 2020; XIV(2):10-26. (In Russ.).
 10. Razumov VV, Bogdanova ND, Razumova NV, Shalnev VA. Landslide hazard in the Mozdok district of the Republic of North Ossetia-Alania. *Science. Innovations. Technologies*. 2024;(2):141-164. (In Russ.).

1. Razumov VV (main author), Likhovid AA, Shapovalov DA, Shagin SI, Razumova NV, Bogdanova ND. Landslide activity in the North Caucasus in the 21st century (edited by Doctor of Geography, Prof. Razumov VV). Moscow: Feoria – Stavropol: North-Caucasus Federal University; 2022. 368 p. (In Russ.).
11. Khatsaeva FM, Tomaev VA. Landslide processes in tectonically active zones of the territory of North Ossetia – Alania. Natural resources of the Republic of North Ossetia-Alania. Volume “Natural and man-made disasters”. Vladikavkaz, 2005. p. 74-81. (In Russ.).
12. Reports on the environmental situation in the Republic of North Ossetia-Alania in 2016–2019. Vladikavkaz: Ministry of Natural Resources and Environment of the Republic of North Ossetia-Alania; 2017–2020. (In Russ.).
13. Information bulletins on the state of subsoil resources in the Russian Federation in 2004–2022. Moscow: Geoinformmark LLC Publishing House; 2005–2023. Issues 28–46. (In Russ.).
14. Information bulletins on the state of subsoil resources in the North Caucasian Federal District of the Russian Federation for 2015–2023. Essentuki: Publishing House of the Southern Regional Center for Marine and Marine Science of the Federal State Budgetary Institution Gidrospetsgeologiya; 2016–2024. Issues 12–20. (In Russ.).
15. Information reports on the manifestations of exogenous geological processes in the territory of the Russian Federation (by quarters) for 2007–2023. Moscow: Publishing house of the Center for State Marine and Marine Science of the Federal State Budgetary Institution Gidrospetsgeologiya; 2007–2023. (In Russ.).
16. Information reports on the manifestations of exogenous geological processes in the territory of the Southern Federal District (by quarters) for 2005–2010. Essentuki: Publishing house of the Southern Regional Center for State Marine and Marine Science of the Federal State Budgetary Institution Gidrospetsgeologiya; 2005–2010. (In Russ.).
17. Information reports on the manifestations of exogenous geological processes in the territory of the Southern and North Caucasian Federal Districts (by quarters) for 2011–2012. Essentuki: Publishing house of the Southern Regional Center for State Marine and Marine Science of the Federal State Budgetary Institution Gidrospetsgeologiya; 2011–2012. (In Russ.).

18. Information reports on the manifestations of exogenous geological processes in the territory of the North Caucasian Federal District (by quarters) for 2013–2023. Essentuki: Publishing house of the Southern Regional Center of the State Scientific-Mechanical Society of the Federal State Budgetary Institution "Gidrospetsgeologiya"; 2013–2023. (In Russ.).
19. Tsogoev V.B. Geology and useful minerals. Vladikavkaz: Proekt-Press; 2005. 390 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Виктор Владимирович Разумов – доктор географических наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела стихийных явлений Высокогорного геофизического института.

Наталья Дмитриевна Богданова – инженер ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве».

Наталья Викторовна Разумова – кандидат географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник АО «Российские космические системы».

Наталья Владимировна Кондратьева – доктор географических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела стихийных явлений Высокогорного геофизического института.

Вклад авторов

Виктор Владимирович Разумов. Определение идеи статьи и логики исследования. Сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Наталья Дмитриевна Богданова. Сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Подготовка текста и оформление статьи.

Наталья Викторовна Разумова. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта.

Наталья Владимировна Кондратьева. Сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи.

Information about the authors

Viktor V. Razumov – Dr. Sci. (Geogr.), Professor, Leading Researcher at the Department of Natural Phenomena of the High-Altitude Geophysical Institute.

Natalia D. Bogdanova – Engineer of the Institute of Geotechnics and Engineering Surveys in Construction, LLC.

Natalia V. Razumova – Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Leading Researcher of JSC “Russian Space Systems”.

Nataliya V. Kondratyeva – Dr. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Senior Research Associate of the Department Natural Phenomena of the High-Mountain Geophysical Institute.

Contribution of the authors

Viktor V. Razumov. Definition of the idea of the article and the logic of the study. Collection, interpretation and analysis of the received data. The approval of the final version is the acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Natalia D. Bogdanova. Collection, interpretation and analysis of the received data. Preparation of the text and design of the article.

Natalia V. Razumova. Preparation and editing of the text – drafting of the manuscript and the formation of its final version.

Nataliya V. Kondratyeva. Collection, interpretation and analysis of the received data. Preparation and editing of the text – drafting of the manuscript.



Научная статья
УДК 544.015.4
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.5>

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФАЗОВОГО ПОВЕДЕНИЯ ПРИРОДНОЙ УГЛЕВОДОРОДНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ПЛАСТОВОЙ ВОДЫ

Лейсан Тимуровна Абдразакова^{1*},
Александр Янович Гильманов²,
Александр Павлович Шевелёв³

^{1, 2, 3} Тюменский государственный университет (д. 6, ул. Володарского, Тюмень, 625003, Российская Федерация)

¹ stud0000262117@study.utmn.ru; <https://orcid.org/0009-0001-5318-3037>

² a.y.gilmanov@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7115-1629>

³ a.p.shevelev@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0017-4871>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Для разработки газоконденсатных месторождений необходимо предсказывать фазовое поведение многокомпонентной углеводородной системы. Существующие модели не учитывают наличие нескольких корней уравнения материального баланса и минерализации воды. Поэтому целью работы является создание методики расчёта фазового состояния газоконденсатной смеси с учётом определения всех корней уравнения материального баланса и минерализации пластовой воды. Впервые определение количества корней уравнения материального баланса осуществляется с использованием теоремы Штурма. Объектом исследования является пласт, содержащий газоконденсатную смесь. В данной работе предложена методика для расчета фазового поведения многокомпонентной углеводородной системы, благодаря которой можно рассчитать все корни уравнения материального баланса фаз. В отличие от традиционного алгоритма такая методика предполагает использование уравнения Сеченова для расчета коэффициентов бинарного взаимодействия в зависимости от минерализации воды. Отыскание мольной доли газовой фазы осуществляется с использованием теоремы Штурма и алгоритма последовательного деления многочленов Евклида. Таким образом, исключаются ранее найденные корни и снова применяет-

ся итерационный метод Ньютона. Результаты расчетов для модельного объекта свидетельствуют о том, что мольная доля газовой фазы составляет для базового варианта более 32 %. Получено распределение компонентов по жидкой и газовой фазам. Исследовано влияние температуры, давления и минерализации воды на мольную долю газовой фазы. На основе расчетов для модельного объекта установлено, что область двухфазного состояния соответствует узкому диапазону пластовых давлений (4,5-6 атм). С ростом давления мольная доля газовой фазы уменьшается в силу перехода системы в жидкое состояние.

Ключевые слова: псевдокomпонент, многокомпонентная углеводородная система, теорема Штурма, коэффициенты бинарного взаимодействия, фугитивность, коэффициенты бинарного взаимодействия, минерализация

Для цитирования: Абдразакова Л. Т., Гильманов А. Я., Шевелёв А. П. Методика расчета фазового поведения природной углеводородной системы с учетом минерализации пластовой воды // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 1. С. 117–136. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.5>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.12.2024;
одобрена после рецензирования 01.03.2025;
принята к публикации 20.03.2025.

2.8.4. Development and Operation of Oil and Gas Fields (Technical Sciences)

Research article

Methodology for calculation of phase behavior of a natural hydrocarbon system with account of formation water mineralization

**Leisan T. Abdrazakova^{1*},
Aleksandr Ya. Gilmanov²,
Aleksandr P. Shevelev³**

^{1, 2, 3} University of Tyumen (6, Volodarskogo St., Tyumen, 625003, Russian Federation)

¹ stud0000262117@study.utmn.ru; <https://orcid.org/0009-0001-5318-3037>

² a.y.gilmanov@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7115-1629>³ a.p.shevelev@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0017-4871>

* Corresponding author

Abstract.

The development of gas condensate fields requires the prediction of phase behavior. The existing models do not consider the presence of several roots of material balance equation and water mineralization. Therefore, the aim of the work is to develop the methodology for calculation of phase state of a gas condensate mixture, considering the determination of all the roots of the material balance equation and mineralization of reservoir water. For the first time, the number of roots of the material balance equation is determined using Sturm's theorem. The object of the study is a reservoir containing a gas condensate mixture. The paper develops the methodology for calculation of phase behavior of a multicomponent hydrocarbon system. Unlike the traditional algorithm, this methodology involves the Sechenov equation. The molar fraction of the gas phase is found using Sturm's theorem and the algorithm of sequential division of Euclidean polynomials. The calculation results for the model object indicate that the molar fraction of the gas phase is more than 32 %. The distribution of the components over the phases is obtained. The effect of temperature, pressure, and salinity of water on the molar fraction of the gas phase has been researched. Based on calculations for the model object, it was found that the region of the two-phase state corresponds to a narrow range of reservoir pressures. As the pressure increases, the molar fraction of the gas phase decreases due to the transition of the system to a liquid state.

Keywords:

pseudocomponent, multicomponent hydrocarbon system, Sturm's theorem, binary interaction coefficients, fugacity, binary interaction coefficients, mineralization

For citation:

Abdrzakova LT, Gilmanov AY, Shevelev AP. Methodology for calculation of phase behavior of a natural hydrocarbon system with account of formation water mineralization. Science. Innovations. Technologies. 2025;(1):117-136. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.5>

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 26.12.2024;
approved after reviewing 01.03.2025;
accepted for publication 20.03.2025.

Введение

Разработка газоконденсатных месторождений, содержащих значительные запасы углеводородов в России и мире [1, 2], сопряжена с рядом трудностей. Основной из них является ретроградная конденсация, приводящая к выпадению газового конденсата при падении пластового давления (рис. 1) [3]. Это приводит к неполной выработке извлекаемых запасов, что является экономически неэффективным. Добыть такой конденсат при эксплуатации залежи в режиме истощения не представляется возможным, за исключением случаев крайне низких пластовых давлений около 1 МПа, когда начинаются процессы прямого испарения. Другие проблемы, например, связанные с накоплением конденсата в скважинах, с выносом потока газа остаточной воды, проявляются в меньшей степени и могут быть решены корректировкой технологии разработки газоконденсатных месторождений [2, 4].

Решение проблемы ретроградной конденсации компонентов углеводородной системы возможно с помощью поддержания пластового давления. С этой целью возможно использование технологии сайклинг-процесса [6]. Однако её эффективное применение невозможно без прогнозирования требуемых давлений, при которых ретроградная конденсация не происходит.

Для этого на практике широко применяются инструменты моделирования фазового поведения многокомпонентных углеводородных систем [7–9]. Входными данными в ходе таких расчётов являются: состав смеси, критические параметры компонентов, термобарические условия пласта [10, 11]. Как правило, группу тяжёлых углеводородных компонентов с небольшими мольными долями для ускорения процедуры расчётов объединяют в псевдокомпонент, свойства которого вычисляют с помощью корреляционных зависимостей [12]. Традиционный алгоритм моделирования предполагает расчёт коэффициентов распределения компонентов по фазам из приближения идеальных газов и жидкостей, определение мольных долей компонентов из решения системы уравнений материального баланса, вычисление коэффициентов сверхсжимаемости из уравнения состояния с учётом правил смешения [13], расчёт фугитивностей компонентов и пересчёт коэффициентов распределения с повторением всей остальной процедуры [14–16]. Вычисления завершаются, когда

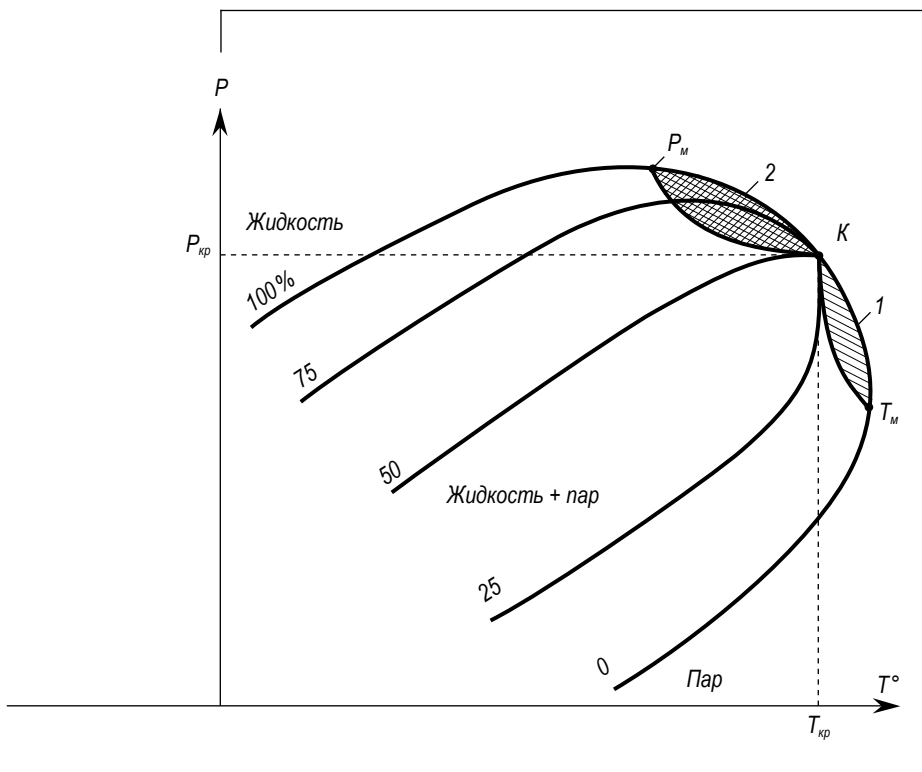
**Рис. 1.****Фазовая диаграмма двухкомпонентной системы.**

Fig. 1. Phase diagram of a two-component system.

Источник:

составлено по данным [5].

Source:

compiled according to data [5].

фугитивность каждого компонента в жидкой фазе становятся приблизительно равной фугитивности этого компонента в газовой фазе с заданной точностью [15]. Поскольку свойства псевдокомпонента определены приближённо, проводят настройку модели на экспериментальные данные, например, на результаты дифференциальной конденсации, или на промысловые параметры [17–19].

Описанный алгоритм зарекомендовал себя на практике при построении фазовых диаграмм многокомпонентных углеводородных систем [20–22]. Однако он не учитывает влияние минерализации пластовой воды, которая может изменять фазовое поведение [23]. Традиционные эмпирические корреляционные зависимости для такого расчёта применимы с допустимой точностью только в

узком диапазоне термобарических условий [5]. Кроме того, традиционный алгоритм не учитывает возможность наличия нескольких корней у уравнения материального баланса, которое в случае наличия большого количества компонентов имеет высокую степень [15]. В этом случае корень уравнения должен определяться с учётом физического смысла и может уточнить результаты расчётов. Поэтому целью работы является создание методики расчёта фазового состояния газоконденсатной смеси с учётом определения всех корней уравнения материального баланса и минерализации пластовой воды. Впервые определение количества корней уравнения материального баланса осуществляется с использованием теоремы Штурма.

Материалы и методы исследований

В качестве входных данных рассматриваемой многокомпонентной углеводородной системы являются мольные доли компонентов в смеси n_i , критические параметры этих компонентов, пластовые давление и температура, плотности и молярные массы компонентов. В системе присутствуют тяжелые углеводородные компоненты с малой мольной долей, поэтому проводится объединение в псевдокомпонент. Он будет неким комплексом, усредняющим свойства углеводородов с пентана по эйкозан. Для псевдокомпонента по корреляционным зависимостям [23] рассчитываются следующие параметры: молярная масса, относительная плотность, температура кипения, критическая температура, ацентрический фактор.

В отличие от традиционных методов при расчёте коэффициентов бинарного взаимодействия компонентов учитывается минерализация воды. Формулы для расчёта этих коэффициентов либо не согласуются с экспериментальными данными в некотором диапазоне минерализации [23], либо не упоминаются в публикациях. Влияние содержащихся в пластовой воде солей на растворимость природного газа учитывается уравнением Сеченова:

$$C'_{ij} = C_{ij} \cdot 10^{\alpha_i \cdot m_{water}} \quad (1)$$

где α_i – коэффициент Сеченова, минерализация m_{water} подставляется в г-молей соли на 1 кг чистой воды;

- C_{ij} – коэффициент бинарного взаимодействия между i -ым и j -ым компонентом;
- C_{ij}' – коэффициент бинарного взаимодействия между i -ым и j -ым компонентом с учётом минерализации пластовой воды.

Далее из приближения идеального раствора и идеального газа определяются предварительные коэффициенты распределения компонентов K_i по жидкой и газовой фазе [14].

Чтобы понимать, в какой фазе находится многокомпонентная углеводородная система при рассчитанной мольной доле газовой фазы и заданных пластовых условиях, следует добавить условие на мольную долю газовой фазы V . Если она меньше нуля, то смесь находится в однофазном ненасыщенном жидком состоянии, которой соответствует условие:

$$\sum_{i=1}^N n_i \cdot K_i < 1 \quad (2)$$

Если она равна нулю, то смесь в состоянии, соответствующем однофазной насыщенной жидкости:

$$\sum_{i=1}^N n_i \cdot K_i = 1 \quad (3)$$

Если она равна единице, то смесь соответствует однофазному насыщенному паровому состоянию:

$$\sum_{i=1}^N \frac{n_i}{K_i} = 1 \quad (4)$$

Если она больше единицы, то смесь находится в однофазном ненасыщенном газовом состоянии:

$$\sum_{i=1}^N \frac{n_i}{K_i} < 1 \quad (5)$$

В системе учитываются 20 углеводородов и 5 неуглеводородных компонентов, из-за этого уравнение материального баланса для определения мольной доли газовой фазы

$$F(V) = \sum_{i=1}^N \frac{n_i(K_i-1)}{V(K_i-1)+1} = 0 \quad (6)$$

имеет высокий порядок. В традиционных алгоритмах рассчитывается только один корень этого уравнения с использованием численных методов. Для того чтобы качественно определить точное число действительных корней, на заданном интервале применяется теорема Штурма. Для её применения уравнение (6) приводится к виду полинома относительно V :

$$f(V) = A_{10} \cdot V^{10} + A_9 \cdot V^9 + A_8 \cdot V^8 + A_7 \cdot V^7 + A_6 \cdot V^6 + A_5 \cdot V^5 + A_4 \cdot V^4 + A_3 \cdot V^3 + A_2 \cdot V^2 + A_1 \cdot V + A_0 \cdot V^0 \quad (7)$$

где $A_0, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9, A_{10}$ – коэффициенты полинома.

Выражение (7) определяет полином с индексом 0 из ряда Штурма. Первый полином соответствует производной:

$$f'(V) = 10 \cdot A_{10} \cdot V^9 + 9 \cdot A_9 \cdot V^8 + 8 \cdot A_8 \cdot V^7 + 7 \cdot A_7 \cdot V^6 + 6 \cdot A_6 \cdot V^5 + 5 \cdot A_5 \cdot V^4 + 4 \cdot A_4 \cdot V^3 + 3 \cdot A_3 \cdot V^2 + 2 \cdot A_2 \cdot V + A_1 \quad (8)$$

Последующие полиномы вычисляются по формуле:

$$f_{k+1}(V) = -f_{k-1}(V) \bmod f_k(V) \quad (9)$$

где k – индекс полинома Штурма;
 $\bmod$ – остаток от деления многочлена на многочлен.

Расчет по формуле (9) повторяется до тех пор, пока не будет получен полином 0-го порядка.

Далее рассчитывается количество перемен знаков в ряде Штурма в начале и в конце рассматриваемого интервала. Модуль разности между полученными значениями определяет количество действительных корней.

После этого применяется итерационный метод Ньютона с начальным приближением 0,5 и погрешностью 0,01%, с помощью которого находится первый корень решаемого уравнения:

$$V_{new} = V_{old} - \frac{f(V_{old})}{f'(V_{old})} \quad (10)$$

где V_{old} – значение мольной доли газовой фазы с предыдущей итерации;
 V_{new} – значение мольной доли газовой фазы с текущей итерации.

Далее последовательным делением многочленов Евклида исключается найденный корень, и понижается порядок полинома. И снова методом Ньютона находится следующий действительный корень. Такая процедура проводится до тех пор, пока не будут известны все действительные корни в промежутке от –1000 до 1000. Затем из всех найденных действительных корней выбирается наибольших из принадлежащих диапазону от 0 до 1 с учётом физического смысла мольной доли газовой фазы.

Используются правила смешения для расчётов коэффициентов уравнения состояния для жидкой и газовой фазы.

Из уравнения состояния Брусилковского методом Кардано определяются коэффициенты сверхсжимаемости для жидкой и газовой фазы. В качестве значения коэффициента сверхсжимаемости для газовой фазы берётся наибольший корень, для жидкой – наименьший, поскольку газ занимает больший объём, чем жидкость.

Далее рассчитываются фугитивности компонентов в жидкой и газовой фазах по соотношениям:

$$f_{iV} = \exp \left(\frac{b_i}{b_v} (z_v - 1) - \ln(z_v - B_{1V}) - \chi_v \ln \lambda_v + \ln(y_i p) \right) \quad (11)$$

где χ_v, λ_v введены для упрощения формулы фугитивности газовой фазы и равны:

$$\chi_v = \frac{A_{1V}}{B_{1V} \cdot 2\sqrt{2}} \left(2 \sum_{j=1}^N \frac{y_j \sqrt{a_i a_j}}{a_v} (1 - C_{ij}) - \frac{b_i}{b_v} \right) \quad (12)$$

$$\lambda_v = \frac{z_v + (\sqrt{2+1}) \cdot B_{1V}}{z_v + (1 - \sqrt{2}) \cdot B_{1V}} \quad (13)$$

$$f_{iL} = \exp \left(\frac{b_i}{b_l} (z_l - 1) - \ln(z_l - B_{1L}) - \chi_l \ln \lambda_l + \ln(x_i p) \right) \quad (14)$$

где χ_l, λ_l введены для упрощения формулы фугитивности жидкой фазы и равны:

$$\chi_l = \frac{A_{1L}}{B_{1L} \cdot 2\sqrt{2}} \left(2 \sum_{j=1}^N \frac{x_i \sqrt{a_i a_j}}{a_l} (1 - C_{ij}) - \frac{b_i}{b_l} \right) \quad (15)$$

$$\lambda_l = \frac{z_l + (\sqrt{2+1}) \cdot B_{1L}}{z_l + (1 - \sqrt{2}) \cdot B_{1L}} \quad (16)$$

Осуществляется пересчёт коэффициентов распределения по формуле:

$$K_i = K_i \frac{f_{iL}}{f_{iV}} \quad (17)$$

Проверяется, достигнута ли заданная погрешность ε в разнице фугитивностей компонентов в жидкой и газовой фазе:

$$|f_{iL} - f_{iV}| \leq \varepsilon \quad (18)$$

Если условие выполняется, расчёт заканчивается, иначе идёт возврат к проверке условий, в какой фазе находится многокомпонентная углеводородная система.

Результаты исследований и их обсуждение

На примере модельной пластовой системы, параметры которой приведены в таблице 1, проведён расчёт её фазового состояния. Пластовая температура 77 °С, пластовое давление 5 атм, минерализация m_{water} равна 1,05 (базовый вариант). В таблице введены параметры системы:

T_{ci} — критическая температура компонентов;
 P_{ci} — критическое давление;

w_i – ацентрический фактор;
 n_i – мольная доля;
 ρ_{ci} – относительная плотность;
 M_i – молярная масса.

Таблица 1. СОСТАВ МОДЕЛЬНОЙ ПЛАСТОВОЙ УГЛЕВОДОРОДНОЙ СИСТЕМЫ
Table 1. Composition of the model reservoir hydrocarbon system

Компонент	T_{ci} , К	P_{ci} , атм	w_i	M_i , г/моль	ρ_m , кг/м ³	n_i , моль
H ₂ S	373,2	88,2	0,1	34	993	0,01
CO ₂	304,2	72,8	0,225	44	777	0,01
O ₂	154,6	49,2	0,021	32	1149	0,01
H ₂	33,2	12,8	0,01	2	71	0,01
H ₂ O	647,3	217,6	0,344	18	998	0,01
C ₁	190,6	45,4	0,008	16	425	0,41
C ₂	305,4	48,2	0,098	30	548	0,2
C ₃	369,8	41,9	0,152	44	582	0,1
C ₄	425,2	37,5	0,193	58	579	0,01
C ₅	469,6	33,3	0,251	72	626	0,012
C ₆	507,4	29,3	0,296	86	659	0,01
C ₇	540,2	27	0,351	100	684	0,01
C ₈	568,8	24,5	0,394	114	579	0,02
C ₉	594,6	23,1	0,444	128	718	0,02
C ₁₀	617,6	21,6	0,49	142	73	0,02
C ₁₁	638,8	19,4	0,535	156	74	0,02
C ₁₂	658,3	18	0,564	170	748	0,011
C ₁₃	657,8	17	0,623	184	756	0,02
C ₁₄	694	16	0,679	198	763	0,025
C ₁₅	707	15	0,706	212	769	0,015
C ₁₆	717	14	0,742	226	773	0,04
C ₁₇	733	13	0,77	240	778	0,01
C ₁₈	745	11,9	0,79	254	777	0,01
C ₁₉	756	11	0,827	268	789	0,01
C ₂₀	767	11	0,907	282	775	0,005

Анализ данных из таблицы 1 показывает, что доля тяжелых углеводородных компонентов небольшая в сравнении с легкими компонентами, что позволяет ввести псевдокомпонент. В соответствии с распространенной методикой на практике объединение в псевдокомпонент происходит, начиная с пентана.

- K_i —
 x_i —
 y_i —

итоговые значения коэффициентов распределения,
мольная доля компонента в жидкой фазе,
мольная доля компонентов в газовой фазе представ-
лены в таблице 2.

Таблица 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ
Table 2. Results of calculation of phase state

Компонент	K_i	x_i	y_i
H ₂ S	1,272819	0,009926792	0,012635
CO ₂	1,491177	0,009868965	0,014716
O ₂	1,900909	0,009762257	0,018557
H ₂	2,799218	0,009536195	0,026694
H ₂ O	0,858709	0,01003834	0,00862
C ₁	1,769375	0,097962606	0,173333
C ₂	1,452831	0,148186072	0,215289
C ₃	1,189658	0,099489933	0,118359
C ₄	1,002418	0,009999346	0,010024
C ₅₊	0,674989	0,595229493	0,401773

Результаты расчетов для модельного объекта свидетельствуют о том, что мольная доля газовой фазы находится в обратной зависимости от пластового давления (рис. 2) и составляет для базового варианта более 32%, что обусловлено низким пластовым давлением (5 атм) и сравнительно высокой температурой (77°С). Обратный характер зависимости обусловлен постепенным переходом системы в жидкую фазу при росте давления.

Применение теоремы Штурма показывает, что имеется только один действительный корень уравнения материального баланса для заданной пластовой системы.

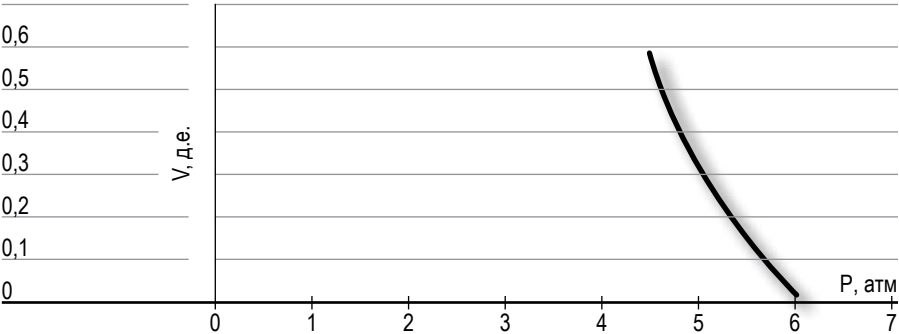


Рис. 2. Зависимость мольной доли газовой фазы от пластового давления.

Fig. 2. Dependence of the molar fraction of the gas phase on reservoir pressure.

Источник: составлено авторами.
Source: compiled by authors.

С увеличением температуры мольная доля газовой фазы увеличивается, что соответствует прямым процессам на фазовой диаграмме многокомпонентной углеводородной системы (рис. 3).

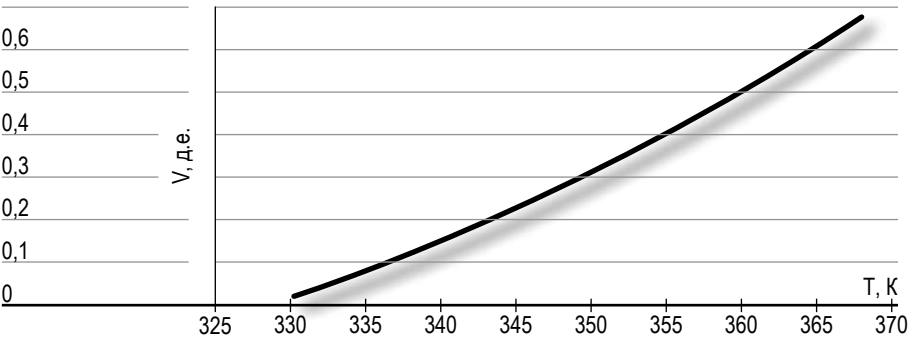


Рис. 3. Зависимость мольной доли газовой фазы от температуры.

Fig. 3. Dependence of the molar fraction of the gas phase on temperature.

Источник: составлено авторами.
Source: compiled by authors.

Результаты исследований влияния минерализации пластовой воды на мольную долю газовой фазы для базового варианта остальных параметров приведены на рисунке 4. С увеличением минерализации воды возрастают коэффициенты бинарно-

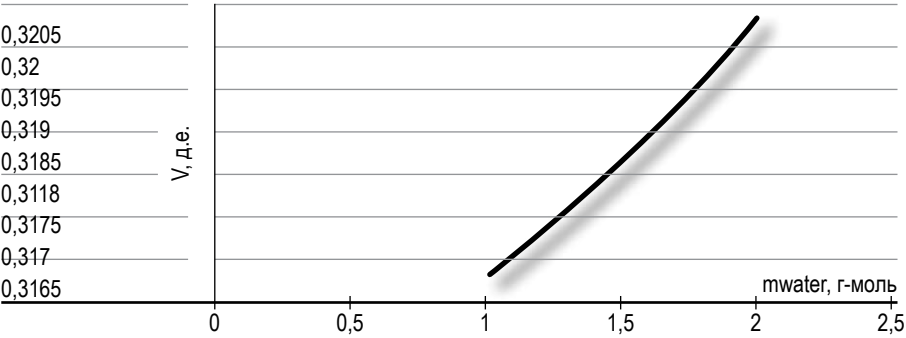


Рис. 4.

Зависимость мольной доли газовой фазы от минерализации воды.

Fig. 4. Dependence of the molar fraction of the gas phase on water mineralization.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

го взаимодействия согласно (1), что приводит к увеличению степени отклонения системы от идеальных газов и жидкостей, т. е. росту поправочных коэффициентов в уравнении состояния. В результате мольная доля газовой фазы практически линейно увеличивается с ростом минерализации воды.

Заключение

Разработана методика расчета фазового состояния многокомпонентной углеводородной системы, позволяющая определить все действительные корни уравнения материального баланса и выбрать из них подходящий по физическому смыслу, а также учесть влияние минерализации пластовой воды.

На основе расчетов для модельного объекта установлено, что область двухфазного состояния соответствует узкому диапазону пластовых давлений (4, 5–6 атм). С ростом давления мольная доля газовой фазы уменьшается в силу перехода системы в жидкое состояние.

Показано, что увеличение минерализации пластовой воды приводит к практически линейному увеличению мольной доли газовой фазы, однако ее влияние существенно меньше, чем у пластовых термобарических условий.

Список источников

1. Ишмуратов Т.А. и др. Совершенствование подходов к расчету PVT-свойств пластовых флюидов нефтегазовых, нефтегазоконденсатных и газоконденсатных залежей месторождений на территории деятельности «РН-Пур-нефтегаз» / Т.А. Ишмуратов, А. И. Хамидуллина, Р. Р. Исламов, А. А. Хисамов, А. Р. Абдульмянов, А.А. Сенина, А.Е. Андреев, И. Г. Опритов, А. Ф. Абдуллин, А. М. Логашин // Нефтяное хозяйство. 2021. № 12. С. 92–96. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-12-92-96>
2. Варламов Д. И. и др. Опыт применения технологий одновременно-раздельной эксплуатации скважин на месторождениях СП «Вьетсовпетро» / Д. И. Варламов, Е. Н. Грищенко, С. В. Баранова, А. А. Баранов // Нефтяное хозяйство. 2023. № 7. С. 58–64. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-7-58-64>
3. Петренко Н. Н., Бондаренко М. А., Петренко В. И. Оценка масштабов ретроградной конденсации в гигантском газоконденсатном месторождении // Наука. Инновации. Технологии. 2013. № 2. С. 99–106.
4. Eikeland K. M., Hansen H. Dry gas reinjection in a strong waterdrive gas/condensate field increases condensate recovery – case study: the Sleipner Øst Ty field, South Viking Graben, Norwegian North Sea // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. 2009. Vol. 12. No. 2. P. 281–296. <https://doi.org/10.2118/110309-PA>
5. Брусиловский А. И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. М.: Грааль, 2002. 575 с.
6. Dong M., Huang S., Hutchence K. Methane pressure-cycling process with horizontal wells for thin heavy-oil reservoirs // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. 2006. Vol. 9. No. 2. P. 154–164. <https://doi.org/10.2118/88500-PA>
7. Рейтблат Е. А. и др. Моделирование свойств углеводородов в залежи со значительной дифференциацией вязкости и плотности нефти по геологическому разрезу / Е.А. Рейтблат, Е. В. Рожина, А. И. Комягин, Д. Н. Глумов, И. А. Опарин, А. И. Будько // Нефтяное хозяйство. 2022. №8. С. 82–85. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-8-82-85>
8. Варавва А. И. и др. Опыт создания и сопровождения моделей лифта скважин подгазовых зон нефтяных оторочек на примере Новопортовского НГКМ и Тазовского НГКМ / А. И. Варавва, Р. Т. Апасов, Г. Т. Апасов, Д. В. Виноградов, Ф.

- И. Полковников, Д. В. Платонов, Д. А. Самоловов // Society of Petroleum Engineers. (SPE-201962-RU, Москва, 26–29 октября 2020). Москва, 2020. С. 1–13.
9. Ogbeiwi P., Stephen K. D. Optimizing the value of a CO₂ water-alternating-gas injection project under geological and economic uncertainties // SPE Journal. 2024. Vol. 29. No. 6. P. 3348–3368. <https://doi.org/10.2118/219458-PA>
 10. Федоров К., и др. Дизайн водогазового воздействия: пути достижения смешиваемости, инструменты и методы анализа, оценка эффективности / К. Федоров, Т. Поспелова, А. Кобяшев, П. Гужиков, А. Васильев, А. Шевелёв, И. Дмитриев // Society of Petroleum Engineers (SPE-196758-RU, Москва, 15–17 октября 2020). Москва, 2020. С. 1–16.
 11. Caldas P. F. B., Kirkman G., Ungar F., Yang T. Evaluation of PVT comparisons and GOR prediction based on advanced mud gas data: a case study from Snorre field // Petrophysics. 2024. Vol. 65. No. 4. P. 532–547. <https://doi.org/10.30632/PJV65N4-2024a8>
 12. Ющенко Т. С., Брусиловский А. И. Моделирование PVT-свойств природных газоконденсатных смесей с учётом наличия остаточной воды в коллекторе // Society of Petroleum Engineers (SPE-176728-RU, Москва, 26–28 октября 2020). Москва, 2020. С. 1–20.
 13. Whitson K. H., Brule M. R. Phase behavior. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2000. 233 p.
 14. Luo S., Chen F., Zhou D., Nasrabadi H. Multiscale pressure/volume/temperature simulation of decreasing condensate/gas ratio at greater than dewpoint pressure in shale gas-condensate reservoirs // SPE Journal. 2021. Vol. 26. No. 6. P. 4174–4186. <https://doi.org/10.2118/203905-PA>
 15. Ширковский А. И. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. М.: Недра, 1987. 309 с.
 16. Sutton R. P. Fundamental PVT calculations for associated and gas/condensate natural-gas systems // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. 2007. Vol. 10. No. 3. P. 270–284. <https://doi.org/10.2118/97099-PA>
 17. Киселев Д. А., Шевелёв А. П., Гильманов А. Я. Адаптация алгоритма расчета фазового равновесия многокомпонентной системы применительно к месторождениям с неопределенностью в исходных данных // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика.

2019. Том 5. № 2. С. 89–104. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2019-5-2-89-104>
18. Hamdi H., Behmanesh H., Clarkson C. R. A semianalytical approach for analysis of wells exhibiting multiphase transient linear flow: application to field data // SPE Journal. 2020. Vol. 25. No. 6. P. 3265–3279. <https://doi.org/10.2118/196164-PA>
19. Potsch K., Toplack P., Gumpenberger T. A review and extension of existing consistency tests for PVT data from a laboratory // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. 2017. Vol. 20. No. 2. P. 269–284. <https://doi.org/10.2118/183640-PA>
20. Ким В. В. и др. Методика подбора аналогов моделей PVT пластового флюида и экспресс-оценка параметров PVT для новых активов / В. В. Ким, Н. О. Матрошилов, К. А. Печко, А. А. Афанасьев, М. В. Симонов // Нефтяное хозяйство. 2023. № 12. С. 36–39. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-12-36-39>
21. Ильясов У. Р. и др. Сравнительный анализ свойств компонентов и фракций при PVT-моделировании / У. Р. Ильясов, А. Г. Лутфурахманов, Д. В. Ефимов, А. А. Пашали // Нефтяное хозяйство. 2020. № 5. С. 64–67. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-5-64-67>
22. Pan H., Chen Y., Sheffield J., Chang Y.-B., Zhou D. Phase-behavior modeling and flow simulation for low-temperature CO₂ injection // SPE Reservoir Evaluation and Engineering. 2015. Vol. 18. No. 2. P. 250–263. <https://doi.org/10.2118/170903-PA>
23. Гриценко А. И. Исследование влияния воды на фазовые превращения газоконденсатных смесей // Газовое дело. 1964. № 4. С. 3–5.

References

1. Ishmuratov TA, Khamidullina AI, Islamov RR, Khisamov AA, Abdulmyanov AR, Senina AA, Andreev AE, Opritov IG, Abdullin AF, Logashin AM. Improvement of approaches for calculating PVT properties of reservoir fluids of oil and gas, oil-gas-condensate and gas-condensate deposits on the territory of activity of RN-Purneftegaz LLC. Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry. 2021;(12):92-96. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2021-12-92-96>
2. Varlamov DI, Grishchenko EN, Baranova SV, Baranov AA. Case record of dual completion deployment in Vietsovpetro wells. Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry. 2023;(7):58-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-7-58-64>

3. Petrenko NN, Bondarenko MA, Petrenko VI. Estimation of the scales of retrograde condensation in a giant gas-condensate field. *Science. Innovations. Technologies*. 2013;(2):99-106. (In Russ.).
4. Eikeland KM, Hansen H. Dry gas reinjection in a strong waterdrive gas/condensate field increases condensate recovery – case study: the Sleipner Øst Ty field, South Viking Graben, Norwegian North Sea. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. 2009;12(2):281-296. <https://doi.org/10.2118/110309-PA>
5. Brusilovsky AI. Phase transformations in the development of oil and gas fields. Moscow: Graal; 2002. 575 p. (In Russ.).
6. Dong M, Huang S, Hutchence K. Methane pressure-cycling process with horizontal wells for thin heavy-oil reservoirs. *SPE Reservoir Evaluation and Engineering*. 2006;9(2):154-164. <https://doi.org/10.2118/88500-PA>
7. Reitblat EA, Rozhina EV, Komyagin AI, Glumov DN, Oparin IA, Budko AI. Modeling properties of hydrocarbons in a reservoir with significant differentiation of oil density and viscosity. *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry*. 2022;(8):82-85. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-8-82-85>
8. Varavva AI, Apasov RT, Apasov GT, Vinogradov DV, Polkovnikov FI, Platonov DV, Samolovov DA. Experience in creating and maintaining well lift models of subgas zones of oil rims using the example of Novoportovskoye OGCF and Tazovskoye OGCF. In *Society of Petroleum Engineers Conference paper SPE-201962-RU*, Moscow, October 26-29, 2020;1-13. (In Russ.).
9. Ogbeiwi P, Stephen KD. Optimizing the value of a CO₂ water-alternating-gas injection project under geological and economic uncertainties. *SPE Journal*. 2024;29(6):3348-3368. <https://doi.org/10.2118/219458-PA>
10. Fedorov K, Pospelova T, Kobyashev A, Guzhikov P, Vasiliev A, Shevelev A, Dmitriev I. Water-gas stimulation design: ways to achieve miscibility, tools and methods of analysis, efficiency assessment. In *Society of Petroleum Engineers Conference paper SPE-196758-RU*, Moscow, October 15-17, 2020;1-16. (In Russ.).
11. Caldas P. F. B., Kirkman G., Ungar F., Yang T. Evaluation of PVT comparisons and GOR prediction based on advanced mud gas data: a case study from Snorre field. *Petrophysics*. 2024;65(4):532–547. <https://doi.org/10.30632/PJV65N4-2024a8>

12. Yushchenko TS, Brusilovsky AI. Modeling PVT properties of natural gas condensate mixtures taking into account the presence of residual water in the reservoir. In Society of Petroleum Engineers Conference paper SPE-176728-RU, Moscow, October 26-28, 2020;1-20. (In Russ.).
13. Whitson KH, Brule MR. Phase behavior. Richardson: Society of Petroleum Engineers; 2000. 233 p.
14. Luo S, Chen F, Zhou D, Nasrabadi H. Multiscale pressure/volume/temperature simulation of decreasing condensate/gas ratio at greater than dewpoint pressure in shale gas-condensate reservoirs. SPE Journal. 2021;26(6):4174-4186. <https://doi.org/10.2118/203905-PA>
15. Shirkovsky AI. Development and operation of gas and gas condensate fields. Moscow: Nedra; 1987. 309 p. (In Russ.).
16. Sutton RP. Fundamental PVT calculations for associated and gas/condensate natural-gas systems. SPE Reservoir Evaluation and Engineering. 2007;10(3):270-284. <https://doi.org/10.2118/97099-PA>
17. Kiselev DA, Shevelev AP, Gil'manov AYa. Adaptation of the algorithm for calculating the phase equilibrium of a multicomponent system as applied to fields with uncertainty in the initial data. Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy. 2019;5(2):89-104. (In Russ.). <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2019-5-2-89-104>
18. Hamdi H, Behmanesh H, Clarkson CR. A semianalytical approach for analysis of wells exhibiting multiphase transient linear flow: application to field data. SPE Journal. 2020;25(6):3265-3279. <https://doi.org/10.2118/196164-PA>
19. Potsch K, Toplack P, Gumpenberger T. A review and extension of existing consistency tests for PVT data from a laboratory. SPE Reservoir Evaluation and Engineering. 2017;20(2):269-284. <https://doi.org/10.2118/183640-PA>
20. Kim VV, Matroshilov NO, Pechko KA, Afanasyev AA, Simonov MV. Methodology for selecting analogs of reservoir fluid PVT models and rapid estimation of PVT parameters for new assets. Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry. 2023;(12):36-39. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-12-36-39>
21. Ilyasov UR, Lutfurakhmanov AG, Efimov DV, Pashali AA. Comparative analysis of the properties of hydrocarbon components and fractions in PVT modeling. Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry. 2020;(5):64-67. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-5-64-67>

22. Pan H, Chen Y, Sheffield J, Chang Y-B, Zhou D. Phase-behavior modeling and flow simulation for low-temperature CO₂ injection. SPE Reservoir Evaluation and Engineering. 2015;18(2):250-263. <https://doi.org/10.2118/170903-PA>
23. Gritsenko AI. Study of the influence of water on phase transformations of gas condensate mixtures. Gazovoe delo = Gas Business. 1964;(4):3-5. (In Russ.).

Информация об авторах

Лейсан Тимуровна Абдразакова – студент бакалавриата Школы естественных наук Тюменского государственного университета, Researcher ID: LXU-4539-2024

Александр Янович Гильманов – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры моделирования физических процессов и систем Тюменского государственного университета, Scopus ID: 57205429154, Researcher ID: LXU-4884-2024

Александр Павлович Шевелёв – кандидат физико-математических наук, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем Тюменского государственного университета, Scopus ID: 37013734300, Researcher ID: LXU-4897-2024

Вклад авторов: все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Information about the authors

Leisan T. Abdrazakova – Bachelor Student of the School of Natural Sciences of University of Tyumen, Researcher ID: LXU-4539-2024

Aleksandr Ya. Gilmanov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Department of Modeling of Physical Processes and Systems, University of Tyumen, Scopus ID: 57205429154, Researcher ID: LXU-4884-2024

Aleksandr P. Shevelev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Professor of the Department of Modeling of Physical Processes and Systems, University of Tyumen, Scopus ID: 37013734300, Researcher ID: LXU-4897-2024

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.



Научная статья
УДК 553.981.2
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.6>

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ Е-KON В ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ШУРТАН

Бекзод Хусанович Беков¹,
Орифхон Аббос угли Хужаев^{2*}

¹ УзЛИТИнефтегаз (д. 2, ул. Т. Шевченко, Ташкент, 100029, Узбекистан)

² Узбекнефтегаз (д. 21, ул. Истикбол, Яшнабадский район, Ташкент, 100047, Узбекистан)

¹ b.bekov@liting.uz; <https://orcid.org/0009-0007-5654-5535>

² o.xujayev@ung.uz; <https://orcid.org/0009-0008-5434-3996>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Данная статья посвящена анализу эффективности внедрения системы Е-KON в процесс проектирования и разработки газоконденсатного месторождения Шуртан. Исследование проводится в рамках реализации стратегической программы «Цифровой Узбекистан–2030» и направлено на демонстрацию преимуществ цифровых технологий в нефтегазовой отрасли. В статье акцентируется внимание на ряде ключевых аспектов системы Е-KON, включая оптимизацию технологического режима эксплуатации скважин, увеличение объемов добычи газа и меры по предотвращению обводнения скважин. Одним из таких мер является удаление пластовой воды посредством продувок, что обеспечивает более стабильную работу скважин и минимизирует риски потери производительности. Рассмотрены возможности интеграции системы Е-KON с базами данных, что способствует улучшению управляемости данными и позволяет оперативно отслеживать и анализировать эксплуатационные показатели. Такой подход обеспечивает снижение эксплуатационных расходов, позволяет гибко регулировать производственные процессы, принимать обоснованные управленческие решения на основе точных данных и хранить все данные в одном месте. Анализ практических результатов использования системы Е-KON показал положительные эффекты, среди которых прирост объемов добычи

газа, а также общая оптимизация операций. Представленные данные подтверждают, что система E-KON способствует не только повышению производительности, но и общему улучшению эффективности управления месторождением и обеспечению устойчивого развития газоконденсатного месторождения. В статье также подчеркивается важность внедрения передовых информационных технологий для повышения прозрачности процессов, улучшения мониторинга и принятия оперативных решений, что способствует снижению рисков и увеличению доходности проектов.

Ключевые слова: газоконденсатное месторождение, добыча газа, технологический режим скважин, обводненность, дебит скважин, продувка скважин, база данных

Для цитирования: Беков Б. Х., Хужаев О. А. Эффективность внедрения технологии e-kon в процесс проектирования и разработки газоконденсатного месторождения Шуртан // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 1. С. 137–148. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.6>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.01.2025;
одобрена после рецензирования 26.02.2025;
принята к публикации 15.03.2025.

2.8.4. Development and Operation of Oil and Gas Fields (Technical Sciences)

Research article

The efficiency of E-KON system in the design and development process of the Shurtan gas condensate field

**Bekzod Kh. Bekov¹,
Orifkhon A. Khujaev^{2*}**

¹ UzLITINeftgaz (2, T. Shevchenko St., Tashkent, 100029, Uzbekistan)

² Uzbekneftgaz (21, Istikbol St., Yashnabad district, Tashkent, 100047, Uzbekistan)

¹ b.bekov@liting.uz; <https://orcid.org/0009-0007-5654-5535>

² o.xujayev@ung.uz; <https://orcid.org/0009-0008-5434-3996>

* Corresponding author

Abstract.

The article analyzes the efficiency of E-KON system in the design and development process of the Shurtan gas condensate field. The study is conducted within the framework of the strategic program Digital Uzbekistan-2030 and aims to demonstrate the advantages of digital technologies in the oil and gas industry. The article highlights a number of key aspects of the E-KON system, including the optimization of technological well operation modes, increased gas production volumes, and measures to prevent well flooding. One such measure is the removal of formation water through blowouts, which ensures more stable well operation and minimizes the risks of productivity loss. The possibilities of integrating the E-KON system with databases have been considered, which contributes to improved data management and allows for the prompt monitoring and analysis of operational performance. This approach ensures a reduction in operational costs, enables flexible regulation of production processes, facilitates informed management decisions based on accurate data, and stores all data in one place. The analysis of the practical results of using the E-KON system showed positive effects, including an increase in gas production volumes and overall optimization of operations. The data presented confirm that the E-KON system not only contributes to improved productivity but also enhances the overall effectiveness of field management and ensures the sustainable development of the gas condensate field. The article also emphasizes the importance of implementing advanced information technologies to enhance process transparency, improve monitoring, and facilitate operational decision-making, which helps reduce risks and increase project profitability.

Keywords:

gas condensate field, gas production, well operation mode, water cut, well flow rate, well blowout, database

For citation:

Bekov BKh, Khujaev OA. The efficiency of E-KON system in the design and development process of the Shurtan gas condensate field. Science. Innovations. Technologies. 2025;(1):137-148. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.6>

Conflict of interest:

the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 22.01.2025;
approved after reviewing 26.02.2025;
accepted for publication 15.03.2025.

Введение

Рост потребления природного газа обуславливает необходимость оптимизации добычи углеводородов как на новых месторождениях, вводимых в эксплуатацию, так и на длительно разрабатываемых газоконденсатных месторождениях. Это требует разработки стратегий для повышения эффективности эксплуатации скважин, увеличения объемов добычи и снижения эксплуатационных затрат, что становится возможным благодаря использованию современных цифровых технологий [3].

В Узбекистане стартовала реализация программы стратегии «Цифровой Узбекистан – 2030», основной целью которой является активное развитие цифровой экономики через широкое внедрение современных информационно-коммуникационных технологий во все отрасли, включая нефтегазовую промышленность [1]. Одним из ключевых проектов в рамках этой стратегии является проект «Цифровизация газоконденсатных месторождений АО „Узбекнефтегаз“ Е-KON», направленный на комплексную цифровизацию процессов добычи углеводородов и повышение общей производительности месторождений.

Система Е-KON разрабатывается для организации полномасштабной цифровизации нефтегазовых месторождений. Она позволяет проводить оперативную оценку эффективности добычи, выявлять факторы, влияющие на технологический режим эксплуатации, и прогнозировать добычные возможности скважин на ближайшую перспективу.

Ключевым компонентом системы Е-KON является интегрированная база данных, которая играет важную роль в сборе, хранении и анализе больших объемов данных, поступающих в режиме реального времени. Интеграция базы данных с системой Е-KON обеспечивает:

- централизованное управление данными всех скважин, что упрощает доступ к актуальной информации и снижает вероятность ошибок;
- автоматизацию процессов обработки информации, включая учет объемов добычи газа, конденсата и пластовой воды, что ускоряет принятие управленческих решений;
- поддержку аналитических инструментов для выявления отклонений и оперативного реагирования на из-

менения в технологических процессах, что повышает общую эффективность эксплуатации скважин [2].

Таким образом, использование системы E-KON в связке с интегрированной базой данных создает основу для повышения производительности месторождений и позволяет эффективно управлять эксплуатационными процессами, что, в конечном итоге, способствует улучшению экономических показателей и устойчивому развитию отрасли [6].

Материалы и методы исследований

Объектом данного исследования являются эксплуатационные скважины № 165, № 185 и № 366 газоконденсатного месторождения (ГКМ) Шуртан, которые были выбраны для детального анализа в рамках проекта «Цифровизация газоконденсатных месторождений АО „Узбекнефтегаз“ E-KON». Эти скважины представляют собой ключевые элементы разработки месторождения и демонстрируют различные эксплуатационные характеристики, что делает их показательными для оценки эффективности внедрения современных цифровых решений.

Внедрение системы E-KON на этих скважинах позволило автоматизировать процесс сбора и анализа данных в режиме реального времени. Вся информация о дебите газа, обводненности продукции, пластовом давлении и других технологических параметрах поступает в центральную базу данных, что обеспечивает возможность ее комплексной обработки. Это позволяет не только оперативно выявлять отклонения в работе скважин, но и строить прогнозы по изменению их производственных показателей.

Интеграция базы данных с системой E-KON обеспечивает сквозное управление данными: от первичного сбора информации до формирования аналитических отчетов. Такой подход позволяет повысить точность мониторинга и оптимизировать процессы эксплуатации скважин, минимизируя влияние человеческого фактора и снижая риски принятия ошибочных решений.

Кроме того, анализ работы скважин № 165, № 185 и № 366 с использованием цифровой базы данных позволяет более эффективно планировать мероприятия по повышению их производительности.

ти, включая оптимизацию режима эксплуатации и минимизацию обводненности за счет своевременного проведения продувок и других технических мероприятий.

Процесс добычи газа из пласта сопровождается неизбежным снижением пластового давления и увеличением влагосодержания добываемого газа. Эти изменения негативно сказываются на производительности скважин и общей продуктивности месторождения [3]. Основной задачей исследования стало обеспечение утилизации пластовой воды непосредственно на месте добычи и создание системы оперативного учета добычи природного газа, газового конденсата и пластовой воды.

В ходе научно-исследовательских работ выявлено, что длительно разрабатываемые газоконденсатные месторождения, включая ГКМ Шуртан, сталкиваются с проблемой высокой обводненности продукции. Для минимизации этого явления регулярно проводятся продувки скважин, которые, однако, снижают коэффициент эксплуатации, так как требуют временной остановки добычи [4].

С внедрением системы E-KON в процесс управления добычей появилась возможность значительно улучшить мониторинг и контроль за состоянием скважин. Автоматизация сбора данных каждые 5 минут позволила получать информацию в реальном времени о дебите газа, уровне обводненности и других параметрах. Эти данные поступают в централизованную базу данных, которая интегрирована с системой E-KON.

Интеграция базы данных и системы E-KON обеспечивает:

- **непрерывное обновление данных:** Все параметры работы скважин фиксируются автоматически, что исключает вероятность ошибок при ручном вводе информации;
- **аналитическую обработку:** Система автоматически обрабатывает поступающие данные, выделяя отклонения от нормального режима работы и формируя рекомендации по корректировке эксплуатационных параметров;
- **прогнозирование и моделирование:** с помощью исторических данных из базы можно строить прогнозы по изменению производственных характерис-

тик скважин и месторождений, что позволяет планировать мероприятия для предотвращения потенциальных проблем [6].

В результате внедрения технологии E-KON были зафиксированы следующие улучшения:

1. **Продление периода работы скважин без продувки:** Некоторые скважины смогли работать дольше без необходимости остановки на продувку, что ранее не наблюдалось.
2. **Точный учет выпускаемого газа при продувке:** появилась возможность фиксировать объемы газа, выпускаемого в атмосферу во время продувок, что важно для мониторинга потерь.
3. **Оперативное выявление и устранение проблем:** Технологические отклонения в работе скважин теперь выявляются в режиме реального времени, что позволяет своевременно принимать меры для их устранения и повышать коэффициент эксплуатации.

Таким образом, использование базы данных и системы E-KON в комплексе позволяет значительно повысить эффективность добычи и снизить операционные риски за счет точного учета, анализа и прогнозирования ключевых показателей работы скважин [6].

Результаты исследований и их обсуждение

На технологических данных эксплуатации трех скважин (скв. №№ 165, 185, 366) ГКМ Шуртан был выполнен анализ их работы до внедрения технологии E-KON – с января 2023 года по октябрь 2023 года, после ее внедрения – с января 2024 года по октябрь 2024 года.

В результате этого анализа установлено, что после внедрения технологии E-KON по скважинам выявлено следующее.

В скважине № 185 прирост добычи газа за август составил 54 тыс. м³, за сентябрь – 7 тыс. м³, за октябрь – 102 тыс. м³, что

в среднем за сутки составляет 1,7; 0,3; 3,3; тыс. м³ соответственно. Суммарный прирост добычи за рассмотренный период составил 163 тыс. м³ газа, что в среднем за сутки составляет 1,8 тыс. м³ и определяется по формуле:

$$\Delta q = \frac{\left(\frac{\Delta t_p \cdot q}{24}\right)}{\frac{t_k}{24}} = \Delta t_p \cdot \frac{q}{t_k},$$

где $\left(\frac{\Delta t_p \cdot q}{24}\right)$ – прирост добычи за рассматриваемый период;
 q – средний дебит;
 t_k – календарное время за рассматриваемый период;
 Δt_p – разница времени работы между рассматриваемыми периодами,

определенная по формуле:

$$\Delta t_p = t_{p1} - t_{p2},$$

где t_{p1} и t_{p2} – время работы в периоды соответственно.

В скважине № 366 прирост добычи газа за август составил 101 тыс. м³, за сентябрь – 98 тыс. м³, за октябрь – 97 тыс. м³, что в среднем за сутки составляет 3,3; 3,5; 3,1; тыс. м³ соответственно. Суммарный прирост добычи за рассмотренный период составил 295 тыс. м³ газа, что в среднем за сутки составляет 3,3 тыс. м³.

В скважине № 165 прирост добычи газа за август составил 116 тыс. м³, за сентябрь – 198 тыс. м³, за октябрь – 88 тыс. м³, что в среднем за сутки составляет 3,7; 7,1; 2,8 тыс. м³ соответственно. Суммарный прирост добычи за рассмотренный период составил 403 тыс. м³ газа, что в среднем за сутки составляет 4,5 тыс. м³.

Результаты выполненного анализа представлены в таблице 1. Согласно данным этой таблицы определён средний прирост добычи природного газа за сутки по одной скважине, равный 3,1 тыс. м³ или 1 116,1 тыс. м³ в год. Однако с учетом рисков при реализации проекта, в расчетах был принят прирост добычи природного газа по скважине, в объеме 2,2 тыс. м³ за сутки или 800,0 тыс. м³ в год.

Таблица 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ГАЗОДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН ГКМ ШУРТАН /
Table 1. The results of the analysis of operational indicators of gas
production wells at the Shurtan gas-condensate field

Период	Средний дебит, тыс. м³/сутки (q)	Время работы в рассматриваемом месяце, час (t _p)	Время на продувку в рассматриваемом месяце, час (t _n)	Календарное время в рассматриваемом месяце, час (t _c)	Коэффициент эксплуатации в рассматриваемом месяце, час (k _{эсп})	Прирост добычи газа в рассматриваемом месяце, тыс. м³ (Δt _г /24·q)	Средний прирост за сутки в рассматриваемом месяце, тыс. м³/сутки
Скв. 185							
Август 2023	85	729	15	744	0,98		
Сентябрь 2023	88	670	2	672	1,00		
Октябрь 2023	88	713	31	744	0,96		
Всего		2112	48	2160	0,98		
Август 2024	86	744	0	744	1,00	54	1,7
Сентябрь 2024	86	672	0	672	1,00	7	0,3
Октябрь 2024	84	742	2	744	0,997	102	3,3
Всего		2158	2	2160	1,00	162	1,8
Полученный эффект		46	-46	0	0,02	162	1,8
Скв. 366							
Август 2023	90	713	31	744	0,96		
Сентябрь 2023	91	642	30	672	0,96		
Октябрь 2023	91	713	31	744	0,96		
Всего		2068	92	2160	0,96		
Август 2024	78	744	0	744	1,00	101	3,3
Сентябрь 2024	78	672	0	672	1,00	98	3,5
Октябрь 2024	75	744	0	744	1,00	97	3,1
Всего		2160	0	2160	1,00	295	3,3
Полученный эффект		92	-92	0	0,04	295	3,3
Скв. 165							
Август 2023	71	710	34	744	0,95		
Сентябрь 2023	77	614	58	672	0,91		
Октябрь 2023	77	713	31	744	0,96		
Всего		2037	123	2160	0,94		
Август 2024	82	744	0	744	1,00	116	3,7
Сентябрь 2024	82	672	0	672	1,00	198	7,1
Октябрь 2024	80	739,5	4,5	744	0,99	88	2,8
Всего		2155,5	4,5	2160	1,00	403	4,5
Полученный эффект		119	-119	0	0,05	403	4,5

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

Заключение

Внедрение системы E-KON на газоконденсатном месторождении Шуртан обеспечило новый уровень управления эксплуатацией скважин за счет непрерывного сбора и анализа фактических данных о работе скважин в режиме реального времени. Возможность получать данные с интервалом каждые 5 минут позволяет не только оперативно выявлять отклонения в технологическом процессе, но и своевременно принимать меры для их устранения. Это способствует более стабильной и эффективной работе оборудования, снижению риска аварийных ситуаций и простоев.

На основе проведенных научно-исследовательских работ установлено, что одной из ключевых проблем эксплуатации скважин является обводненность продукции. Для ее минимизации на Шуртанском месторождении проводятся регулярные продувки скважин для удаления жидкости с забоев. Система E-KON позволяет контролировать этот процесс более точно: измерять объемы газа, выпускаемого в атмосферу, и фиксировать моменты, когда продувка необходима, что ранее осуществлялось по предварительно утвержденному графику без учета фактического состояния скважин.

Кроме того, E-KON способствует повышению коэффициента эксплуатации скважин за счет продления их межремонтного периода, так как позволяет заранее обнаруживать технологические проблемы и устранять их до наступления критических условий. Таким образом, система обеспечивает более рациональное использование ресурсов, снижая эксплуатационные затраты и увеличивая объемы добычи углеводородов.

Внедрение цифровых решений, таких как E-KON, не только повышает производительность отдельных скважин, но и улучшает общую эффективность управления месторождением. В результате наблюдается положительное влияние на ключевые экономические показатели, включая рост рентабельности производства, снижение эксплуатационных расходов и увеличение объемов добычи природного газа и газового конденсата. Таким образом, цифровизация отрасли через проекты типа E-KON демонстрирует потенциал для значительных улучшений как на уровне отдельных месторождений, так и для всей нефтегазовой отрасли в целом.

Список источников

1. Постановления Президента Республики Узбекистан от 24 мая 2023 года № ПП-162 «О мерах по расширению охвата и повышению качества цифровых услуг, а также цифровой трансформации сфер, отраслей и регионов». URL: <https://lex.uz/ru/docs/6472568> (дата обращения: 17.11.2024).
2. Рабочий проект «Система цифровизации месторождений АО «Узбекнефтегаз» – «E-KON»», ULNG-06723-1102-010-04306-ALL-EXP-0011-R1. Ташкент, 2023. 359 с.
3. Назаров У. С., Сайдахмедов Э. Э., Абдурахимов М. А., Ли Р. Ч., Кенжаев Б. Н. Принципы модернизации систем подготовки и переработки природного газа при доработке месторождений углеводородного сырья. Монография. Ташкент: АО «O'ZLITINEFTGAZ», 2021. 310 с.
4. Назаров У. С. Информационная система анализа разработки нефтегазовых месторождений // Известия АН РУз, серия: «Информатика». 1993. № 6.
5. Беков Б. Х., Шовхийев С. Б. Дополнение к проекту доработки газоконденсатного месторождения Шуртан // Отчет о НИР. Фонды АО "OZLITINEFTGAZ". Ташкент, 2022. 66 с.
6. Хужаев О. А., Муратов А. С., Маллаев С. Э., Гуламов Р. А., Ташходжаев Б. А. Единая база данных нефтегазовой отрасли Республики Узбекистан основа цифровой трансформации АО «Узбекнефтегаз» // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. 2024. 8(125). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/18070> (дата обращения 07.12.2024). <https://doi-10.32743/UniTech.2024.125.8.18070>

References

1. Presidential Decree of the Republic of Uzbekistan, May 24, 2023, No. PP-162 "On Measures to Expand the Coverage and Improve the Quality of Digital Services, as well as the Digital Transformation of Sectors, Industries, and Regions". Available from: <https://lex.uz/ru/docs/6472568> [Accessed: 17 November 2024]. (In Russ.).
2. The Working Project "Digitalization System of the Fields of JSC Uzbekneftegaz – 'E-KON'", ULNG-06723-1102-010-04306-ALL-EXP-0011-R1., Tashkent: 2023. 359 p. (In Russ.).
3. Nazarov US, Saidakhmedov EE, Abdurakhimov MA, Li RCh, Kenjaev BN. Principles of Modernization of Natural Gas Preparation and Processing Systems in the Development of Hy-

drocarbon Fields. Monograph. O'ZLITINEFTGAZ JSC. Tashkent; 2021. 310 p. (In Russ.).

4. Nazarov US. Information System for the Analysis of Oil and Gas Field Development. News of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, Series: "Informatics". 1993;(6). (In Russ.).
5. Bekov BKh, Shovkhiev SB. Supplement to the Project for the Further Development of the Shurtan Gas Condensate Field. Report on R&D. Funds of JSC OZLITINEFTGAZ Tashkent: 2022. 66 p. (In Russ.).
6. Khujaev OA, Muratov AS, Mallaev SE, Gulamov RA, Tashk-hodjaev BA. Unified Database of the Oil and Gas Industry of the Republic of Uzbekistan: The Basis for the Digital Transformation of JSC "Uzbekneftegaz". Universum: Technical Sciences: electronic scientific journal. 2024;8(125). Available from: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/18070> [Accessed 7 December 2024]. (In Russ.). <https://doi-10.32743/UniTech.2024.125.8.18070>

Информация об авторах

Бекзод Хусанович Беков – начальник отдела разработки газовых месторождений АО «УзЛТИНефтегаз».

Орифхон Аббос угли Хужаев – руководитель группы по управлению базой данных центра моделирования АО «Узбекнефтегаз».

Вклад авторов: все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Information about the authors

Bekzod Kh. Bekov – Head of the Gas Field Development Department, JSC UzLITINeftGaz.

Orifkhon A. Khujaev – Head of the Database Management Group, Modeling Center, JSC Uzbekneftegaz.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.



Научная статья
УДК 622.276.4
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.7>

О ВЫБОРЕ ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА В КАЧЕСТВЕ ПОГЛОЩАЮЩЕГО ПЛАСТА- КОЛЛЕКТОРА ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОКОВ

Рамиз Алиджавад-оглы Гасумов^{1*},
Эльдар Рамизович Гасумов²

¹ Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)

² Азербайджанский технический университет (д. 25, пр-т Гусейна Джа-
вида, Баку, Азербайджанская Республика)

¹ R.Gasumov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4700-2391>

² e.gasumov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2704-0523>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

В статье выполнены сбор, обобщение и анализ геологических и промысловых материалов, а также рассмотрены геолого-гидрогеологические условия для подземного захоронения сточных вод, с обоснованием выбора водоносного горизонта в качестве поглощающего пласта-коллектора. Для анализа и оценки текущего контроля гидродинамических параметров поглощающего горизонта использовались данные пробных, одиночных и кустовых откачек и закачек в скважинах, принимая за расчетную схему напорного неограниченного в плане поглощающего горизонта. Исследования по определению совместимости сточных вод с пластовыми водами горизонта проводились как расчетными методами, включая физико-математическое моделирование, так и экспериментальным путем. Выполнен анализ фильтрационных параметров поглощающего пласта по результатам гидродинамических исследований.

Ключевые слова: водоносный пласт, сточные воды, полигон, подземные захоронения, горизонт, скважина, месторождения

Для цитирования: Гасумов Р. А., Гасумов Э. Р. О выборе водоносного горизонта в качестве поглощающего пласта-коллектора для захоронения промышленных стоков // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 1. С. 149–176. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.7>

Конфликт интересов: один из авторов статьи — доктор технических наук, профессор Гасумов Рамиз Алиджавад-оглы является членом редакционной коллегии журнала «Наука. Инновации. Технологии». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой рукописью.

Статья поступила в редакцию 30.09.2024;
Одобрена после рецензирования 30.11.2024;
Принята к публикации 15.12.2024.

2.8.4. **Development and Operation of Oil
and Gas Fields (Technical Sciences)**
Research article

**On the selection of an aquifer as an absorbing
reservoir for the disposal of industrial wastewater**

**Ramiz A. Gasumov^{1*},
Eldar R. Gasumov²**

¹ North-Caucasus Federal University (1, Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation)

² Azerbaijan Technical University (25, Huseyn Javid Ave., Baku, Azerbaijan Republic)

¹ R.Gasumov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4700-2391>

² e.gasumov@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-2704-0523>

* Corresponding author

Abstract. The article presents the collection, generalization and analysis of geological and field data, as well as the consideration of geological and hydrogeological conditions for underground disposal of wastewater, with the justification of the choice of an aquifer as an absorbing reservoir bed. For the analysis and assessment of the current control of the hydrodynamic parameters of the absorbing reservoir, the data of test, single and cluster pumping and injection in wells were used, taking as the calculation scheme of a pressure unlimited absorbing horizon. The studies to determine the compatibility of wastewater with formation waters of the horizon were carried out both by calculation methods, including physical and mathematical modeling, and experimentally. The analysis of the filtration parameters of the absorbing reservoir was performed based on the results of hydrodynamic studies.

Keywords: aquifer, wastewater, landfill, underground disposal, aquifer, well, deposits

For citation: Gasumov RA, Gasumov ER. On the selection of an aquifer as an absorbing reservoir for the disposal of industrial wastewater. Science. Innovations. Technologies. 2025;(1):149-176. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.7>

Conflict of interest: one of the authors of article — Ramiz A. Gasumov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, is a member of Editorial Board of journal “Science. Innovations. Technologies”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this manuscript.

The article was submitted 30.09.2024;
approved after reviewing 30.11.2024;
accepted for publication 15.12.2024.

Введение

В процессе эксплуатации объектов добычи, хранения и транспортировки углеводородов, в том числе подземного хранилищ газа, образуются в большом количестве сточные воды, которые требуют их утилизации. Практика показывает, что ресурсы поверхностных вод, формирующиеся за счет атмосферных осадков, довольно значительны, что определяется метеорологическими характеристиками. Одним из более эффективных способов решения данной проблемы является захоронение промышленных стоков, в том числе сточных вод, в глубоких недрах земли, что отвечает соответствующим требованиям, предъявляемым к пластам-коллекторам для создания полигона захоронения.

Материалы и методы исследований

Для исследования использованы промысловые, статистические материалы, информация из открытой печати, а также отчёты производственных и научных организаций, результаты лабораторных исследований. Для проведения вычислительных экспериментов в системе «стоки – подземные воды – вмещающие породы» использовался программный вычислительный комплекс «Селектор». Для анализа и оценки текущего контроля гидродинамических параметров поглощающего горизонта использовались данные пробных, одиночных и кустовых откачек и закачек в скважинах, принимая за расчетную схему напорного неограниченного в плане поглощающего горизонта. Была проанализирована промыслово-геофизическая характеристика разреза турнейского яруса нижнего карбона, также по нагнетательным скважинам. Исследования по определению совместимости сточных вод с пластовыми водами турнейского горизонта проводились как расчетными методами, включая физико-математическое моделирование, так и экспериментальным путем. В аналитических исследованиях использовались пробы пластовой и сточных вод, использован алгоритм резервуарной динамики, позволяющий моделировать процессы применительно к пластовым условиям.

Результаты исследований и их обсуждение

Как известно, для размещения промышленных стоков используются различные геологические структуры, а в нашем случае для подземного захоронения сточных вод рассматривался водоносный горизонт, как наиболее отвечающий требованиям, предъявляемым к пластам-коллекторам. Изучаемый водоносный комплекс терригенных отложений нижнего карбона представлен водовмещающими породами, содержит песчаники и алевролиты тульского и бобриковского возраста, разделенные прослоями аргиллитов [1, 2]. В региональном плане тульский и бобриковский водоносные горизонты взаимосвязаны и представляют единый водоносный комплекс, по водообильности и положению статических уровней идентичны, где пластовое давление составляет 11,4–12,3 МПа. По данным гидродинамических исследований (ГДИ) проницаемость песчаников бобриковского горизонта довольно высокая, и в среднем составляет 2,0–2,4 мкм², пьезопроводность 587,5–1640 тыс. м²/сут, а минерализация пластовых вод составляет 247,3–270,3 г/дм³, содержание йода – 10,0 мг/дм³, брома – 551,0 мг/дм³.

Также водовмещающими являются трещиноватые и выщелоченные известняки турнейского яруса, развитые в основном, в зонах рифовых массивов. Из-за отсутствия водоупора на границе с девоном водоносный комплекс турнея гидродинамически связан с водоносным комплексом карбонатного девона [3]. Турнейские известняки залегают на глубинах порядка 1250–1320 м, а покрывкой над водоносным горизонтом служат плотные разности известняков и аргиллиты верхней части турнейского яруса и аргиллиты малиновского надгоризонта. При испытании турнейского водоносного горизонта в скважинах Карашурской площади (вскрыты верхние 200 м отложений разреза, где общая толщина составляет более 400 м) получены дебиты воды от 144 до 245 м³/сут, при депрессиях 0,46 и 1,18 МПа соответственно. Статический уровень пластовых вод устанавливался на глубине 194–212 м. Проницаемость водовмещающих коллекторов составляет 0,02–0,08 мкм², средняя открытая пористость 8,1–13,5 %.

Пластовая вода турнейского горизонта представлена хлоридно-натриевыми рассолами с коэффициентом метаморфизации (Na/Cl) 0,78–0,79 (табл. 1). Газонасыщенность пластовых вод – 220–

280 см³/дм³, где основным компонентом водорастворенного газа является азот – более 95 % об, а содержание метана – менее 0,5 % об., где пластовая температура составляет 26–27°C.

Отложения турнейского яруса нижнего карбона, рассматриваемые в качестве поглощающего горизонта для захоронения сточных вод на ПХГ, в литологическом отношении представлены мощной толщей карбонатных пород. По условиям образования отложения являются рифогенно-карбонатным массивом, сложенным зернистыми органогенно-обломочными известняками иногда с прослоями доломитов. Известняки плотные, массивные, мелкокристаллические, местами трещиноватые, пористые, кавернозные, неслоистые.

По результатам петрофизических исследований керна, отобранного из интервала 1331–1404 м, известковая порода на 98 % состоит из карбоната кальция, оставшиеся 2 % представлены карбонатом магния. Нижняя часть турнейского яруса представлена также известняками, а верхняя часть разреза толщиной 65 м представлена карбонатно-глинистой толщей, которая сложена аргиллитами, местами алевролитистыми, участками известковистыми с прослоями известняков, часто глинистых.

Анализ промысловых материалов показал, что турнейский водоносный горизонт имеет следующие основные геологические свойства в рамках исследуемого вопроса:

- отложения имеют повсеместное распространение в пределах района размещения и выдержаны по толщине;
- водовмещающие отложения представлены порово-кавернозными карбонатными коллекторами, емкостно-фильтрационные свойства (ФЕС) которых позволяют использовать их в качестве хранилища для размещения сточных вод;
- высокая минерализация и отсутствие ценных компонентов в промышленных концентрациях в составе пластовых вод, а также глубина залегания не позволяют использовать выбранный объект для хозяйственно-питьевого, бальнеологического либо промышленного водопользования;

Таблица 1. ИОННО-СОЛЕВОЙ СОСТАВ ПЛАСТОВЫХ ВОД ТУРНЕЙСКОГО ГОРИЗОНТА
Table 1. Ion-salt composition of formation waters of the Tournaisian horizon

Глубина отбора пробы, м	Плотность, г/см³	Минерализация, г/дм³	Содержание ионов (мг/дм³, мг-экв/дм³, %-экв)	
			K ⁺ +Na ⁺	Ca ⁺²
С устья	—	256,25	80104 3483 78	1314 656 15
С устья	1,171	250,3	78075 3395 78	13049 651 15
1321,5	1,164	245,6	76882 3343 78	12830 640 15
1326,5	1,175	267,34	83863 3646 78	13916 694 15
1357,5	1,162	242,18	76320 3318 79	12238 611 15



Рис. 1. Характеристика флюидоупоров турнейского водоносного горизонта.
Fig. 1. Characteristics of the Tournaisian aquifer fluid seals

					pH	Тип воды по В.А. Сулину
	Mg ⁺²	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻		
	4028 331 7	158084 4459,4 100	707 15 —	79 1,3 —	6,15	хлоркальциевый
	3912 322 7	154447 4357 100	687 14 -	45 0,74 —	5,55	хлоркальциевый
	3713 305 7	151655 4277 100	533 11 —	24 — —	5,03	хлоркальциевый
	3953 325 7	164995 4653 100	600 13 —	12 0 —	4,96	хлоркальциевый
	3593 2956 6	149198 4208 100	739 15 —	98 2 —	6,81	хлоркальциевый

— поглощающий горизонт надежно изолирован в раз-
резе водоупорами от вышележащих водоносных и
нижележащих горизонтов (рис. 1) [4].

Кровля турнейского яруса отмечается на глубине
1327 м, и в разрезе выделяются пласты-коллекторы (пласты 1–6), ха-
рактеризующиеся пониженными значениями по нейтронный гамма-
каротаж. Открытая пористость изменяется по разрезу в интервале
1–24 %, в среднем составляя 10%. Эффективные работающие тол-
щины в нагнетательных скважинах составляют 59 и 26 м (табл. 2).

Как известно, контроль за компонентным составом сточных
вод осуществляется в рамках мониторинга подземного захоронения
сточных вод, в целом, значения минерализации стоков на рассмати-
руемом площади подземного хранилища газа (ПХГ) изменяются в

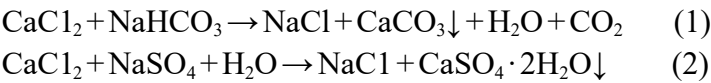
Таблица 2.

ЭФФЕКТИВНЫЕ РАБОТАЮЩИЕ ТОЛЩИНЫ В НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ
Table 2. Effective working thicknesses in injection wells

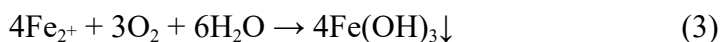
Скважина	Интервал поглощения, м	Эффективная толщина Нэф, м
1–Н	1325–1329	4,0
	1330–1338	8,0
	1343–1351	8,0
	1353–1364	11,0
	1366–1368	2,0
	1370–1376	6,0
	1381–1383	2,0
	1393–1399	6,0
	1465–1469	4,0
	1472–1476	4,0
	1482–1484	2,0
	1494–1496	2,0
Итого:		59,0
2–Н	1326–1329,5	3,5
	1357–1360	3,0
	1401–1407	6,0
	1410–1413	3,0
	1420–1423	3,0
	1432–1437	5,0
	1449,5–1452	2,5
Итого:		26,0

диапазоне 0,806–206,373 г/дм³, и зависят в основном от содержания попутных пластовых вод.

В аналитических исследованиях использовались пробы пластовой и сточных вод, и при визуальных выделениях газа выпадение осадков в процессе смешения не наблюдалось [3]. При определении совместимости жидкостей экспериментальным способом в качестве индикатора был выбран кальций (Ca), который способен образовывать труднорастворимые соли в результате следующих реакций



Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что при смешении исходных жидкостей нерастворимых осадков не образовалось. В аналогичном эксперименте в качестве индикаторных компонентов были взяты ионы Ca_{2+} , Mg_{2+} , SO_{4}^{2-} , которые потенциально способны образовывать осадок в результате смешения пластовой и сточной вод, которые проводилось при температуре 26°C (близко к пластовому), тоже показали об отсутствии процесса выпадения в осадок малорастворимых соединений, связанных с ионами-индикаторами. По истечении времени во всех отобранных смесях было зарегистрировано выпадение осадка. По результатам лабораторных исследований установлено, что пластовые воды турнейского горизонта содержат значительное количество ионов железа $[\text{Fe}_{2+}] = 481 \text{ мг/дм}^3$; $[\text{Fe}_{3+}] = 86,5 \text{ мг/дм}^3$. В присутствии окислителя (кислорода) в растворе Fe_{2+} может окисляться до Fe_{3+} с образованием осадка бурого цвета согласно следующей химической реакции



Содержание растворенного кислорода в сточной воде составило порядка $8,2 \text{ мг/дм}^3$, а фактором, определяющим возможность выпадения осадка из раствора, является pH среды и его значения в пробах стоков в изучаемый период изменялись в диапазоне 6,3–6,9, т.е. стоки имели слабокислую среду, поэтому в ходе выполненных экспериментальных исследований образования нерастворимых осадков не происходило. Закачка сточных вод сопровождается созданием «буферной массы» между пластовой и сточной водой, не сопровождается выпадением в осадок гидроксида железа и не оказывает влияния на приемистость нагнетательной скважины, так как отсутствует контакт указанных растворов в фильтровой зоне нагнетательных скважин (благодаря разделению жидкостей) [7].

Результаты исследований по совместимости пластовых вод со сточными свидетельствуют о том, что образования нерастворимых осадков, за исключением гидроксида железа, в рассматриваемом объекте не происходит. Взаимодействие сточных вод с водорас-

творенными газами поглощающего горизонта также маловероятно вследствие низкой газонасыщенности вод и азотного состава водорастворенных газов.

Для изучения совместимости пластовой и сточной вод был применен вычислительный комплекс «Селектор», использован алгоритм резервуарной динамики, позволяющий моделировать процессы применительно к пластовым условиям [8, 9].

Проведённый физико-химический вычислительный эксперимент (аналогичный лабораторному) дал хорошей сходимости результат, и возможность применения вычислений для последующего моделирования системы «стоки – подземные воды = вмещающие породы» в пластовых условиях. Результаты вычислений свидетельствуют о том, что сточные воды нестабильны, а именно, наблюдаются процессы осадко- и газообразования, где основной причиной нестабильности является присутствие ионов железа и метанола. Содержание метанола понижается на 5,7% относительно исходного раствора, и насыщается продуктами его разложения в основном метаном и углекислым газом, что способствует выпадению доломита $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, а также снижается pH сточных вод. Кислород, растворенный в сточных водах, оказывает меньше влияния на стабильность исследуемых растворов, чем присутствие железа и метанола.

Следующим этапом являлось проведение вычислительных экспериментов (моделирование проводилось в системе C-Br-Ca-Cl-Mg-N-Na-S-Fe-K-H-O) по смешению стоков с пластовой водой и вмещающей породой, при термодинамических параметрах соответствующей пластовым (температура – 26 °C, давление – 15,0 Мпа, ближе к пластовому). Результаты расчёты свидетельствуют, что при добавлении стоков в пласт выпадение осадка $\text{FeO}(\text{OH})$ не происходит за счёт высокой “буферной” массы редокс-пары $\text{Fe}_{2+}/\text{Fe}_{3+}$ пластовой воды по отношению к привнесённому железу.

В моделируемой твердой фазе рассмотрены процессы растворения – кристаллизации, происходящие во вмещающих породах. Внесение стоков в пласт способствует насыщению воды углекислым газом (продуктом разложения метанола) и увеличению кислотности раствора. Эти факторы способствуют растворению

кальцита с последующей перекристаллизацией карбоната кальция в более плотную доломитную форму в соответствии со следующим уравнением



Что касается процесса возможного образования гипса, то в результате смешения стоков и пластовых вод произведение растворимости сульфата кальция не достигается и данный осадок не выпадает, вероятность выпадения сульфата кальция только снижается по мере добавления стоков.

Алгоритм расчётов физико-химического метода, разработанный для оценки совместимости стоков и пластовой воды, также был применён для иллюстрации процессов, происходящих в пласте при кислотной обработке. Обработка 16%-ной соляной кислотой призабойной зоны способствует растворению как породы пласта, так и образованных при закачке осадков, однотипных с породой вмещающего пласта. Образующийся углекислый газ в большей степени накапливается в водной фазе, поэтому во избежание процесса перекристаллизации карбоната кальция из кальцитной формы в доломитную, как было описано выше, по окончании кислотных обработок следует промывать скважину до отсутствия в ней углекислоты. Исходя из этого, были сделаны соответствующие выводы для обоснования совместимости сточных и пластовых вод (рис. 2) [8, 10, 11].

На основании проведенных аналитических и лабораторных экспериментов можно сделать следующие выводы:

- в процессе смешения сточных вод с пластовой водой выпадения труднорастворимых осадков карбоната и сульфата кальция не прогнозируется;
- сточные воды необходимо подготавливать к закачке с целью снижения возможности выпадения труднорастворимых соединений железа, для чего необходимо снижать содержание растворенного кислорода до значений $\leq 5 \text{ мг/дм}^3$.

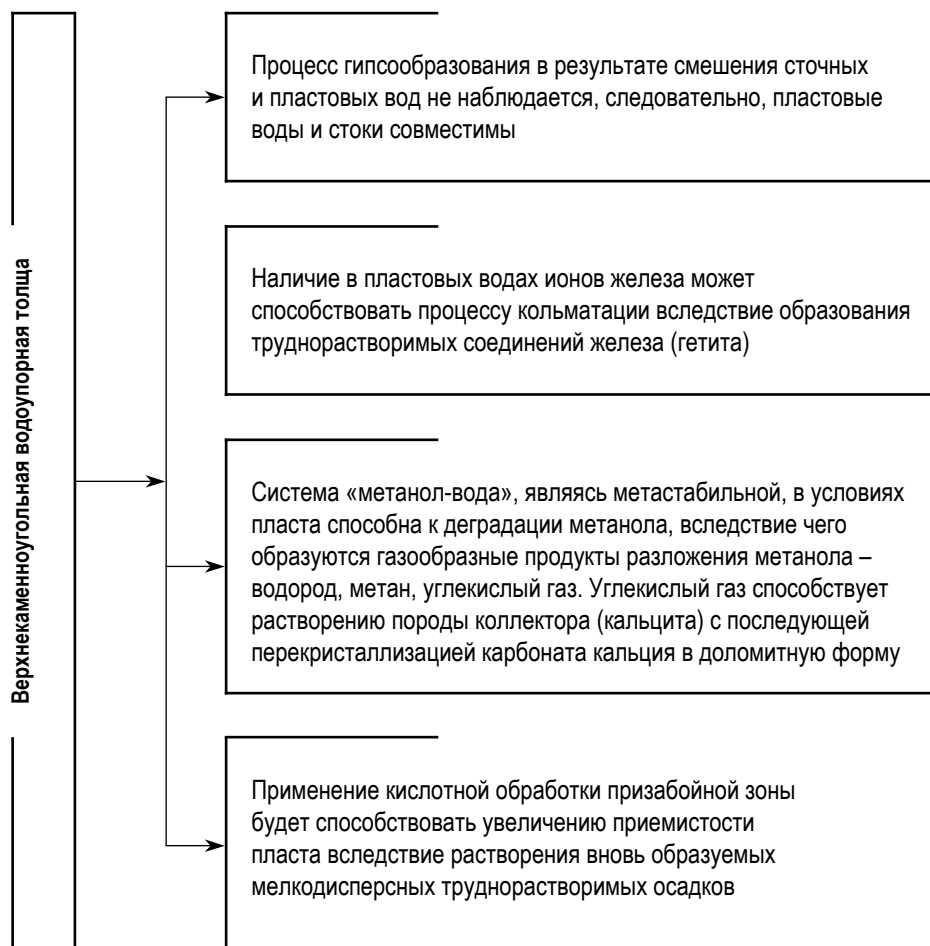


Рис. 2.

Обоснование совместимости сточных и пластовых вод.

Fig. 2. Justification of compatibility of waste and formation waters.

Прогнозные гидрогеологические расчеты для обоснования подземного захоронения сточных вод позволяют сделать выводы по гидрогеологической обстановке на объекте. Увеличение пластового давления в нагнательных скважинах сопровождается формированием конусов репрессии, а его форма вокруг полигона близка к круговой. Объем закачки сточных вод определялся исходя из утвержденных проектных показателей эксплуатации ПХГ. Радиус распространения стоков в окружности можно определить следующим образом [11, 12]

$$R = \alpha \cdot \sqrt{\frac{V \cdot t}{\pi \cdot h_{\text{эф}} \cdot n_0 \cdot \beta}} \quad (5)$$

- где R – радиус распространения сточных вод, м;
 α – коэффициент, учитывающий неоднородность пород поглощающего горизонта (для коллекторов трещинно-порового типа, $\alpha = 3,0$) д.ед.;
 V – годовой объём сточных вод, м³;
 t – расчётный срок эксплуатации полигона ПЗСВ, лет;
 n_0 – эффективная пористость поглощающего пласта, д. ед.;
 $h_{\text{эф}}$ – эффективная мощность поглощающего пласта, м;
 β – коэффициент вытеснения стоками пластовых вод, (для коллекторов трещинно-порового типа, $\beta = 0,7$), д. ед.

Текущий радиус «пятна загрязнения» для нагнетательных скважин определяется по формуле (5), исходя из фактического объема сточных вод, если эффективную толщину принимаем как среднюю между скважинами $\approx 43,0$ м, при расчетном периоде эксплуатации полигона 25 лет, текущий контур «пятна загрязнения» на полигоне составит ≈ 133 м. Радиус распространения сточных вод в поглощающем пласте через 25-летний период эксплуатации в прогнозном объеме 8 300 м³/год с учетом ранее закачанного объема сточных вод составит ≈ 464 м. Прогнозный контур распространения сточных вод представляет собой круг и находится в границах горного отвода ПХГ. Таким образом, возможно осуществлять подземное захоронение прогнозного годового объема сточных вод в течение указанного периода, без изменения существующих границ горного отвода.

Геологическое строение и гидрогеологические условия поглощающего турнейского водоносного горизонта на участке размещения полигона ПХГ позволяют схематизировать граничные условия как напорный неограниченный в плане пласта. Режим эксплуатации полигона захоронения сточных вод – циклический, периодически изменяющийся в разрезе года, что определяется сезонами «отбора-за-

качки» газа в ПХГ, а объем закачки сточных вод определялся исходя из утвержденных проектных показателей эксплуатации объекта.

Расчетная величина давления нагнетания на устье поглощающей скважины определяется выражением

$$P_n = P_{nl} + \Delta P + P_m - P_{cm} \quad (6)$$

Расчет репрессии вследствие закачки сточных вод произведен по двум вариантам:

Вариант 1: Для условия закачки с постоянным расходом в неограниченный пласт по уравнению Тейса-Джейкоба.

Вариант 2: Для условия закачки с изменяющимся расходом в течение периода отбора газа и последующей остановки закачки.

По варианту 1 репрессия на пласт рассчитана по формуле [6, 13]

$$\Delta P = \frac{\gamma_s \cdot Q}{400 \cdot \pi \cdot k_m} \ln \frac{2,25 \cdot \chi \cdot t}{r_c^2} \quad (7)$$

где ΔP_t – увеличение пластового давления вследствие закачки стоков в нагнетательной скважине, МПа;

Q – дебит закачки, м³/сут;

γ – плотность стоков, г/см³;

k_m – водопроводимость пласта, м²/сут;

χ – пьезопроводность пласта, м²/сут;

t – продолжительность закачки, сут; r_{02} – радиус скважины, м.

Гидравлические потери давления в НКТ вычисляются по преобразованной формуле Дарси-Вейсбаха [14, 15]

$$P_m = 1,105 \cdot 10^{-13} \lambda H \beta \quad (8)$$

где P_m – гидравлические потери на трение, МПа;
 λ – коэффициент гидравлического сопротивления трению ($\lambda = 0,032$);
 H – глубина спуска НКТ, м;
 Q – суточный расход сточных вод, м³;
 d – внутренний диаметр НКТ ($d = 0,1$ м), м;
 β – коэффициент, учитывающий местные сопротивления в НКТ ($\beta = 1,1$).

Давление столба стоков в скважине определяется по формуле

$$P_c = \rho \cdot g \cdot h \quad (9)$$

где ρ – плотность сточных вод, г/см³;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 h – высота столба сточных вод, м.

По варианту 2 расчет определения репрессии на конечный срок эксплуатации выполнен по формуле, учитывающей цикличность эксплуатации полигона ПЗСВ [3, 6, 9]

$$\Delta P_t = \left\{ [Q_{cp} R_{tp} - (Q_{cp} - Q_{min}) R_{365} + Q_{max} R_{120}] + Q_{max} 2\mathcal{E} \right\} / 4\pi k_m \quad (10)$$

где k_m – коэффициент водопроницаемости поглощающего горизонта, м²/сут;
 Q_{cp} – средний в разрезе года расход закачки стоков, 22,7 м³/сут;
 Q_{max} – максимальный расход закачки стоков, 250 м³/сут;
 Q_{min} – минимальный расход закачки стоков, м³/сут;
 $\mathcal{E}$ – безразмерный показатель суммарного сопротивления скважины;
 R – безразмерный показатель гидравлического сопротивления:

$$R = \ln 2,25 \chi t / r_{02},$$

где χ – коэффициент пьезопроводности пласта;
 t – время закачки, сут;
 r_{02} – радиус скважины, м;
 t_p – расчетный срок эксплуатации полигона, сут.

Результаты увеличения пластового давления в нагнетательных скважинах и на устье скважин за 25-летний период эксплуатации полигона по вариантам представлены в таблице 3.

Кроме того, циклический характер эксплуатации полигона подземного захоронения сточных вод характеризуется наличием периодов простоя, в течение которых величина пластового давления снижается до начального, что подтверждается данными гидродинамического мониторинга [16, 17]. Таким образом, можно сделать вывод о том, что пробуренные на полигоне нагнетательные скважины должны обеспечивать проектный объем закачки сточных вод ПХГ при допустимых давлениях нагнетания. Расчетные устьевые давления нагнетания не превышают устьевое давление гидроразрыва пласта, составляющее по данным работы порядка 20,0 МПа.

Увеличение пластового давления на полигоне будет распространяться на расстояние, которая определяется по формуле (5). Для расчета приняты усредненные гидрогеологические параметры пласта: водопроницаемость 104 м²/сут, пьезо-опроводность 1,16 × 106 м²/сут. Результаты расчета распространения “конуса репрессии” на различные сроки эксплуатации полигона (табл. 4), показывают, что это сопровождается ухудшением приёмистости поглощающих горизонтов [8, 17, 18].

Снижение приёмистости может происходить вследствие заполнения порово-трещинного пространства пласта-коллектора нерастворенными нефтепродуктами или взвешенными веществами, а также вследствие образования труднорастворимых осадков в результате неудовлетворительной совместимости сточных вод с пластовыми водами и породой поглощающего горизонта [19–22].

Таблица 3.

РАСЧЕТ УВЕЛИЧЕНИЯ ПЛАСТОВОГО ДАВЛЕНИЯ И ВЕЛИЧИНА ДАВЛЕНИЯ НАГНЕТАНИЯ НА УСТЬЕ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН

Table 3. Calculation of the increase in reservoir pressure and the value of injection pressure at the mouth of injection wells

Вариант	Радиус скважины r_0 , м	Водо-проводимость kt , м ² /сут	Пьезо-проводность Пласти, χ , м ² /сут	Начальное пластовое давление, $R_{пл0}$, МПа	Расход закачки, Q , м ³ /сут	Время закачки, t , сут	Репрессия, ΔP_t , МПа	Давление нагнетания, R_n , МПа	Пластовое давление, $R_{пл}$, МПа
1	0,057	101,1	1,027·106	15,40	250	33	0,050	0,47	15,48
					65	120	0,013	0,40	15,80
					22,7	365	0,002	0,39	15,40
						1825	0,002	0,39	15,40
						3650	0,002	0,39	15,40
						5475	0,002	0,39	15,40
						7300	0,002	0,39	15,40
						9125	0,002	0,39	15,40
2	0,057	101,1	1,027·106	15,40		365	0,22	0,64	15,62
						1825	0,22	0,64	15,62
						3650	0,22	0,64	15,62
						5475	0,22	0,64	15,62
						7300	0,22	0,64	15,62
						9125	0,22	0,64	15,62

Вариант	Радиус скважины r_0 , м	Водо-проводимость km , м ² /сут	Пьезо-проводность Пласти, χ , м ² /сут	Начальное пластовое давление, $R_{пл0}$, МПа	Расход закачки, Q , м ³ /сут	Время закачки, t , сут	Репрессия, ΔR_t , МПа	Давление нагнетания, R_n , МПа	Пластовое давление, $R_{пл}$, МПа
1	0,073	107,2	1,285·106	14,50	250	33	0,045	-0,03	14,57
					65	120	0,009	-0,09	14,51
					22,7	365	0,004	-0,10	14,50
					1825	0,005	-0,10	14,50	
					3650	0,005	-0,10	14,50	
					5475	0,005	-0,10	14,50	
					7300	0,005	-0,10	14,50	
					9125	0,005	-0,10	14,50	
2	0,073	107,2	1,285·106	14,50		365	0,09	0,68	14,59
						1825	0,09	0,67	14,59
						3650	0,09	0,67	14,59
						5475	0,09	0,67	14,59
						7300	0,09	0,67	14,59
						9125	0,09	0,67	14,59

Таблица 4.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РЕПРЕССИИ В ПОГЛОЩАЮЩЕМ ПЛАСТЕ

Table 4. Distribution of repression in the absorbing layer

Расход закачки, Q, м³/сут	Время закачки, t, сут	Распространение репрессии, м
250	33	7000
65	120	6000
22,7	365	1000
22,7	1825	3000
22,7	3650	4000
22,7	9125	6000

Таблица 5.

ДОПУСТИМЫЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ
В СТОЧНЫХ ВОДАХ

Table 5. Permissible concentrations of pollutants in wastewater

Компонент	Единица изме- рения	Допустимое содержание в сточных водах		
		Межотраслевые нормы	Отраслевые нормы	Принятые для условий полигона ПЗСВ
Нефтепродукты (эмульгированные)	мг/дм³	15	150	15
Взвешенные вещества	мг/дм³	15	300	20
Железо окисное	мг/дм³	3	3	3
Растворенный кислород	мг/дм³	0,5	5	5
Сероводород	мг/дм³	отсутствие	15	15
Метанол	г/дм³	–	40	40
ДЭГ	г/дм³	–	4	4

Размеры пор поглощающего пласта составляют 10–60 мкм, для беспрепятственного заполнения пласта стоками необходимо, чтобы размер механических примесей не превышал 1,6 мкм. Согласно для порово-трещинного типа коллектора при проницаемости поровой среды матрицы породы до 0,35 мкм² определены нормы качества сточных вод по содержанию в них мехпримесей – до 15 мг/дм³; нефтепродуктов – до 15 мг/дм³ (табл. 5).

При закачке в пласт кислотного раствора при давлениях нагнетания меньших, чем давление гидроразрыва, происходит растворение как непосредственно карбонатного материала слагающего скелет пласта-коллектора, так и труднорастворимых соединений, кольматирующих порово-трещинное пространство. В результате воздействия в призабойной зоне пласта происходит восстановление проницаемости, в некоторых случаях превышая ее первоначальное значение [23–25].

Очевидно, что с увеличением объемов закачки увеличится и объем поступающих в скважину в составе сточных вод взвешенных веществ и нефтепродуктов, что подразумевает более частое проведения работ по восстановлению приемистости. Однако при условии соблюдения требований по подготовке сточных вод к закачке, процесс кольматации за счет увеличения объемов сточных вод, подлежащих захоронению, существенно не скажется на приемистости скважины.

Для предотвращения возможного негативного воздействия полигона захоронения сточных вод на окружающую природную среду предусматривается создание санитарно-защитной зоны. Для нагнетательных скважин эта зона должна состоять из 2-х поясов: первый пояс устанавливают с радиусом 25–30 м от скважины, граница второго пояса проходит по контуру прогнозного ареала распространения сточных вод в поглощающем пласте на проектный срок эксплуатации.

Подземное захоронение сточных вод сопровождается созданием техногенной нагрузки на поглощающий горизонт, в котором нарушается естественное гидродинамическое состояние водонапорной системы. Основные мероприятия в санитарно-защитной зоне полигонов закачки стоков должны быть направлены на ограничение использования недр.

Заключение

Рассмотренные особенности геологического строения и гидрогеологических условий участка недр позволяют сделать вывод о возможности дальнейшего использования турнейских отложений для подземного захоронения сточных вод, поскольку отложения имеют повсеместное распространение, выдержаны по толщине и не выходят на поверхность перекрываются надежным флюидоупором.

Фильтрационно-емкостные свойства пласта-коллектора, представленного высокопроницаемыми карбонатными породами, позволяют осуществлять расчетный контур распространения сточных вод, и позволили установить, что это находится в установленных границах горного отвода подземного хранилища. Выполненные расчеты репрессии на пласт свидетельствуют о возможности закачки сточных вод с устьевыми давлениями нагнетания, не превышающими максимально допустимые.

Исследование показало, что основные изменения гидрогеологической обстановки состоит в том, что на участке подземного захоронения в пласт-коллектор внедряется определенный объем сточных вод, которые вытесняют пластовые воды, частично смешиваясь с ними. При этом в подавляющем большинстве случаев характер миграции стоков в пласте радиальный как от отдельных нагнетательных скважин, так и от полигонов захоронения в целом, форма конуса репрессии вокруг полигона также близка к круговой. Объем закачки сточных вод определялся исходя из утвержденных проектных показателей эксплуатации ПХГ.

Список источников

1. Севастьянов О. М., Захарова Е. Е. Подземное захоронение жидких производственных отходов нефтегазовой отрасли России // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. Т. 6. № 1. URL: http://www.ngtp.ru/rub/7/10_2011.pdf (дата обращения: 21.08.2024).
2. Бешенцев В. А. Захоронение сточных вод в глубокие водонасыщенные горизонты // Научный лидер. 2021. № 9 (11). С. 3–9. URL: <https://scilead.ru/article/154-zakhoronenie-stochnik-vod-v-glubokie-vodonosn> (дата обращения: 21.08.2024).

3. Гарайшин А. С., Рубан Г. Н. Основные критерии выбора пласта-аккумулятора для захоронения промышленных стоков Карашукского подземного хранилища газа // Георесурсы. 2010. № 4 (36). С. 26–29.
4. Парфенова Т. М. Геохимия серы и сернистых соединений куонамского комплекса нижнего и среднего кембрия (восток Сибирской платформы) // Сериальное издание: Георесурсы. 2017. Вып. 1. Т. 19. С. 45–51.
5. Гасумов Э. Р., Гасумов Р. А. Особенности цифрового фильтрационного моделирования продуктивных залежей // Наука. Инновации. Технологии. 2021. № 2. С. 7–28.
6. Gasumov R. A., Gasumov E. R., Minchenko Yu. S. Features of the creation of underground reservoirs in depleted gas condensate fields // Notes of the Mining Institute. 2020. Vol. 244. P. 418–427. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.4>
7. Талеев А. Е., Савенок О. В. Анализ геолого-промысловой информации Восточно-Ламбейшорского месторождения // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2021. № 2. С. 216–225.
8. Завалей В. А., Жумадилов Н. И. Оценка совместимости промышленных сточных вод с пластовыми водами и горными породами на Карачаганакском месторождении // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: материалы XIV Международной конференции. 2015. С. 251–253.
9. Лазутин Н. К., Бешенцев В. А. Гидрогеологические условия захоронения сточных вод на территории Вынгапуровского газового промысла Ямало-Ненетского нефтегазодобывающего региона // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2017. № 3. С. 20–25.
10. Сизикова Г. Г. Оценка воздействия на окружающую среду и мониторинг подземного захоронения сточных вод (на примере Сандибинского месторождения ЯНАО) // Нефтепромысловое дело. 2009. № 4. С. 50–54.
11. Gasumov R. A. et al. Creation of a three-dimensional hydrodynamic model of control horizons to study the system for monitoring the tightness of an underground gas storage facility // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2022. Vol. 333. No. 6. P. 86–95. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/6/3739>
12. Семенов Т. В. Проблемы совместимости пластовых и за-

- качиваемых вод на нефтепромыслах Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2017. № 4. С. 34–37.
13. Соколов А. Ф., Монахова О. М., Алеманов А. Е. Экспериментальная оценка коэффициентов вытеснения пластовых вод и приемистости пластов-приемников при закачке в глубокозалегающие водоносные пласты жидких отходов различного состава при добыче и подземном хранении газа // Актуальные вопросы исследования пластовых систем месторождений углеводородов: сб. науч. ст. М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. С. 146–162.
 14. Kanbetov A. Sh., Kulbatyrov D. K., Abilgazieva A. A., Shakhmanova A. K. Conditions of bottom deposit contamination in north-eastern Caspian field // SOCAR Proceedings. 2023. No. 4. P. 156–161. <https://doi.org/10.5510/OGP20230400929>
 15. Kvitsand H. M. L.; Myrmel M.; Fiksdal L.; Osterhus S.W. Evaluation of bank filtration as a pretreatment method for the provision of hygienically safe drinking water in Norway: Results from monitoring at two full-scale sites // Hydrogeology Journal. 2017. Vol. 25. P. 1257–1269.
 16. Севастьянов О. М., Захарова Е. Е. Геолого-техническое обоснование подземного захоронения промстоков Южно-Субботинского нефтяного месторождения // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2006. № 6. С. 26–32.
 17. Гарайшин А. С., Кантюков Р. Р. Выбор пласта-аккумулятора для захоронения промышленных стоков Арбузовского ПХГ // Георесурсы. 2017. Т. 19. № 1. С. 82–86.
 18. Leusheva E., Morenov V., Tabatabaee Moradi S. Effect of carbonate additives on dynamic filtration index of drilling mud // International Journal of Engineering. 2020. Vol. 33. No. 5. P. 934–939.
 19. Page D., Bekele E., Vanderzalm J., Sidhu J. Managed Aquifer Recharge (MAR) in Sustainable Urban Water Management // Water. 2018. Vol. 10. No. 239. 16 p. <https://doi.org/10.3390/w10030239>
 20. Jones R. et al. Drill cuttings and drilling fluids (muds) transport, fate and effects near a coral reef mesophotic zone // Marine Pollution Bulletin. 2021. Vol. 172. Article No. 112717. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112717>.

21. Инякина Е. И., Левитина Е. Е., Рябикова К. О., Инякин В. В. Исследование пластового флюида при разработке месторождений на шельфе Карского моря // Наука. Инновации. Технологии. 2023. № 1. С. 155–174. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2023.1.8>.
22. Morillas-Espana A. and others. Microalgae based wastewater treatment coupled to the production of high value agricultural products: current needs and challenges // Chemosphere. 2022. Vol. 291. Part 3. Article No. 132968. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132968>
23. Costa C. and others. Physical and chemical characterization of drill cuttings: A review // Marine Pollution Bulletin. 2023. Vol. 194. Part A. Article No. 115342. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115342>
24. Njuguna J. et al. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations // Waste Management. 2022. Vol. 139. P. 362–380. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025>
25. Соколов А. Ф., Монахова О. М. Исследование методами физического моделирования геохимических изменений в глубоководных водоносных пластах при закачке в них жидких отходов // Научно-технический сборник: Вести газовой науки. 2011. № 2 (7). С. 15–26.

References

1. Sevastyanov OM, Zakharova EE. Subsurface disposal of liquid industrial wastes of the oil and gas industry of Russia. Neftegasovaâ geologiâ. Teoriâ i praktika. 2011;6(1). (In Russ.). Available from: http://www.ngtp.ru/rub/7/10_2011.pdf [Accessed 21 August 2024].
2. Beshentsev VA. Disposal of waste water in deep water horizons. Nauchnyi lider = Scientific leader. 2021;9(11):2-9. Available from: <https://scilead.ru/article/154-zakhoronenie-stokh-nikh-vod-v-glubokie-vodonosn> [Accessed 21 August 2024].
3. Garayshin AS, Ruban GN. Main criteria for selecting an accumulator layer for the disposal of industrial wastewater from the Karashuk underground gas storage facility. Georesursy = Georesources. 2010;4(36):26-29. (In Russ.).
4. Parfenova TM. Geochemistry of sulfur and sulfur compounds of the Kuonamsky complex of the Lower and Middle Cambrian

- (east of the Siberian platform). Serial publication: Georesources. 2017;(1)19:45-51. (In Russ.).
5. Gasumov ER, Gasumov RA. Specifics of Digital Filtering Modeling for Productive Deposits (by example of the Koshekhablskoye field). Science. Innovations. Technologies. 2021;(2):7-28. (In Russ.).
 6. Gasumov RA, Gasumov ER, Minchenko YuS. Features of the creation of underground reservoirs in depleted gas condensate fields. Notes of the Mining Institute. 2020;(244):418-427. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.4>
 7. Taleev AE, Savenok OV. Analysis of geological and field information of the Vostochno-Lambeyshorskoye field. Science. Engineering. Technologies (polytechnical bulletin). 2021;(2):216-225. (In Russ.).
 8. Zavalei VA, Zhumadilov NI. Assessment of the compatibility of industrial wastewater with formation waters and rocks at the Karachaganak field. Resource-reproducing, low-waste and environmental technologies for subsoil development. Proceedings of the XIV International Conference. 2015;251-253. (In Russ.).
 9. Lazutin NK, Beshentsev VA. Hydrogeological conditions of wastewater disposal on the territory of the Vyngapurovsky gas field of the Yamalo-Nenets oil and gas producing region. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz = News of higher educational institutions. Oil and gas. 2017;(3):20-25. (In Russ.).
 10. Sizikova GG. Environmental impact assessment and monitoring of underground wastewater disposal (on the example of the Sandibinsky field of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug). Neftepromyslovoe delo = Oilfield Business. 2009;(4):50-54. (In Russ.).
 11. Gasumov RA et al. Creation of a three-dimensional hydrodynamic model of control horizons to study the system for monitoring the tightness of an underground gas storage facility. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2022;333(6):86-95. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/6/3739>
 12. Semenov TV. Problems of compatibility of formation and injected waters in the oil fields of Western Siberia. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz = News of higher educational institutions. Oil and gas. 2017;(4):34-37. (In Russ.).

13. Sokolov AF, Monakhova OM, Alemanov AE. Experimental assessment of the displacement coefficients of formation waters and the injectivity of receiver formations when injecting liquid waste of various compositions into deep-lying aquifers during gas production and underground storage. In Current issues in the study of reservoir systems of hydrocarbon deposits: collection of scientific articles. Moscow: Gazprom VNIIGAZ; 2013. P. 146-162. (In Russ.).
14. Kanbetov ASh et al. Conditions of bottom deposit contamination in north-eastern Caspian field. SOCAR Proceedings. 2023;(4):156-161. (In Russ.). <https://doi.org/10.5510/OGP20230400929>
15. Kvitsand HML and others. Evaluation of bank filtration as a pretreatment method for the provision of hygienically safe drinking water in Norway: Results from monitoring at two full-scale sites. Hydrogeology Journal. 2017;25:1257-1269.
16. Sevastyanov OM, Zakharova EE. Geological and technical substantiation of underground disposal of industrial wastewater from the Yuzhno-Subbotinskoye oil field. Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse = Environmental Protection in the Oil and Gas Complex. 2006;(6):26-32. (In Russ.).
17. Garayshin AS, Kantyukov RR. Selection Formation-Accumulator for Industrial Waste Disposal of Arbuzovsky Underground Gas Storage Facility. Georesursy = Georesources. 2017;19(1):82-86. (In Russ.).
18. Leusheva E, Morenov V, Tabatabaee MS. Effect of carbonate additives on dynamic filtration index of drilling mud. International Journal of Engineering. 2020;33(5):934-939. (In Russ.).
19. Page D, Bekele E, Vanderzalm J, Sidhu J. Managed Aquifer Recharge (MAR) in Sustainable Urban Water Management. Water. 2018;10(239):16. <https://doi.org/10.3390/w10030239>.
20. Jones R, Wakeford M, Randall LC, Miller K, Tonin H. Drill cuttings and drilling fluids (muds) transport, fate and effects near a coral reef mesophotic zone. Marine Pollution Bulletin. 2021;172:112717. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112717>
21. Inyakina EI et al. Investigation of Formation Fluid During the Development of Fields on the Kara Sea Shelf. Science. Innovations. Technologies. 2023;(1):155-174. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2023.1.8>.

22. Morillas-Espana A and others. Microalgae based wastewater treatment coupled to the production of high value agricultural products: current needs and challenges Chemosphere. 2022;(291)3:132968. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132968>
23. Costa C and others. Physical and chemical characterization of drill cuttings: A review. Marine Pollution Bulletin. 2023;(194) A:115342. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115342>
24. Njuguna J. et al. The fate of waste drilling fluids from oil & gas industry activities in the exploration and production operations. Waste Management. 2022;(139):362-380. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.025>
25. Sokolov AF, Monakhova OM. Study of geochemical changes in deep-lying aquifers during injection of liquid waste into them by physical modeling methods. Scientific and technical collection: News of gas science. 2011;2(7):15-26. (In Russ.).

Информация об авторах

Рамиз Алиджавад-оглы Гасумов – доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, заведующий кафедрой базовой кафедры проектирования объектов нефтегазовой сферы Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 6507302404

Эльдар Рамизович Гасумов – кандидат экономических наук, доцент, докторант, Азербайджанский технический университет, Scopus ID: 57217090200

Вклад авторов

Рамиз Алиджавад-оглы Гасумов. Проведены исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Эльдар Рамизович Гасумов. Подготовка и редактирование текста, рисунки – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научно дизайне.

Information about the authors

Ramiz A. Gasumov – Dr. Sci. (Tech.), Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of Department of Basic Department of Design of Oil and Gas Facilities of the Faculty of Oil and Gas Engineering, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 6507302404

Eldar R. Gasumov – Cand. Sci. (Econ), Associate Professor, Doctoral student, Azerbaijan Technical University, Scopus ID: 57217090200

Contribution of the authors

Ramiz A. Gasumov. Carrying out the research; collection, interpretation and analysis of the data obtained. Approval of the final version – acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Eldar R. Gasumov. Preparation and editing of text, drawings; drafting the manuscript and forming its final version, participation in scientific design.



Научная статья
УДК 622.276.4
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.8>

ОСОБЕННОСТИ ДОБЫЧИ НЕФТИ ИЗ НЕФТЕМАТЕРИНСКИХ ПОРОД

Денис Александрович Иванов

ЛУКОЙЛ-Инжиниринг (д. 3, стр. 1б, Покровский б-р, Москва, 109028, Российская Федерация),
Высшая школа нефти, Передовая инженерная школа нефти (д. 186а, ул. Советская, г. Альметьевск, 423450, Российская Федерация)

denis_a_ivanov@hotmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-6402-5134>

Аннотация.

В работе описано текущее состояние добычи из нефтематеринских пород в мире и существующее положение в плане проведения исследований. Добыча из нефтематеринских пород в целом характеризуется двумя последовательными псевдоустановившимися режимами фильтрации из трещиноватой и матричной среды. В работе применен анализ добычи с использованием метода динамического материального баланса для скважин, которые работают в условиях отбора нефти из нефтематеринских пород в псевдоустановившемся режиме на одном объекте в Западной Сибири. Анализ позволил определить объем дренируемых запасов отдельно из трещиноватой среды (включая вторичные трещины от ГРП) и матричной среды. По итогам анализа для отдельных скважин на более поздней стадии определен третий псевдоустановившийся режим с увеличенным объемом дренируемых запасов. Третий режим характеризуется увеличением плотности добываемой продукции и ранее не описан в литературе. Наиболее вероятным источником дополнительного более плотного объема является битуминозная органика, которая в первичном состоянии находится в твердом адсорбированном виде. Данные явления могут происходить только при добыче из нефтематеринских пород, где имеется изобилие битуминозной органики в твердом адсорбированном и жидком растворенном состоянии. Всю природу происходящего на текущем этапе описать не представляется возможным, но вероятно существует ряд совокупных причин включая расширение флюидов, взаимодействие жидкости ГРП

с породой и растрескивание породы за счет депрессии с изменением геометрии порового пространства в процессе разработки. Данные явления характерны только для отдельных горизонтальных скважин с МГРП и не присутствуют, к примеру, при добыче из вертикальных скважин без ГРП.

Ключевые слова: нефтематериские породы, динамический материальный баланс, десорбция, адсорбция, происхождение нефти, горючие сланцы, пиролиз, естественный режим, верхнеюрские отложения, баженовская свита, кероген

Для цитирования: Иванов Д. А. Особенности добычи нефти из нефтематеринских пород // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 1. С. 177–214. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.8>

Финансирование: работа выполнялась в рамках договора между ООО «Лукойл-Инжиниринг» и ООО «Лукойл – Западная Сибирь» в 2023 году по абонентскому обслуживанию.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 14.01.2025;
одобрена после рецензирования 10.03.2025;
принята к публикации 20.03.2025.

2.8.4. Development and Operation of Oil and Gas Fields (Technical sciences) Research article

Some features of source rock oil production

Denis A. Ivanov

LUKOIL-Engineering (3, Bldg 1b, Pokrovsky Blvd, Moscow, 109028, Russian Federation),
Higher School of Petroleum, Advanced Petroleum Engineering School
(186a, Sovetskaya St., Almet'yevsk, Russian Federation)
denis_a_ivanov@hotmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-6402-5134>

Abstract. The paper describes the current state of source rock oil production in the world and the current state of research. Production from source-rocks is generally characterized by two consecutive pseudo-steady state flows from the fractured and the matrix media. The dy-

dynamic material balance method is used to analyze production data for wells that produce in a pseudo-steady-state from one source-rock field in Western Siberia. The analysis allowed us to determine the volume of drained reserves separately from the fractured medium (including secondary fractures from hydraulic fracturing) and the matrix medium. Based on the results of the analysis, a third pseudo-steady-state regime with an increased volume of drained reserves was determined for individual wells at a later stage of production. The third mode is characterized by an increase in the density of the produced oil products and has not been previously described in the literature. The most likely source of an additional denser fluid is the bituminous organic matter, which in its primary state is in a solid adsorbed form. These phenomena can occur only in source-rock, where there is an abundance of bituminous organic matter in a solid adsorbed and liquid dissolved state. It is not possible to describe the entire nature of what is happening at the current stage, but full description will include a combination of effects including the expansion of fluids, the interaction of hydraulic fracturing fluid with rock and rock cracking due to depression with a change in the geometry of the pore space during development. These phenomena are typical only for individual horizontal wells with multistage hydraulic fracturing and are not present, for example, when producing from vertical wells without hydraulic fracturing.

Keywords: oil source rocks, flowing material balance, desorption, adsorption, origin of oil, oil shale, pyrolysis, natural oil flow, Upper Jurassic deposits, Bazhenov formation, kerogen

For citation: Ivanov DA. Some features of source rock oil production. Science. Innovations. Technologies. 2025;(1):177-214. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.8>

Funding: the work was carried out under the agreement between LUKOIL-Engineering LLC and LUKOIL – Zapadnaya Sibir LLC in 2024 as part of a service contract.

Conflict of interest: the author declares no conflicts of interests.

The article was submitted 14.01.2025;
approved after reviewing 10.03.2025;
accepted for publication 25.03.2025.

Введение

Разработка и промышленная добыча нефти из нефтематеринской породы развивается быстрыми темпами, опережая все ранее сделанные прогнозы. Объемы добычи сланцевой нефти в США существенно изменили структуру мирового производства и потребления углеводородного сырья [1]. Появление технологий горизонтального бурения с многостадийным ГРП одномоментно превратило добычу из нефтематеринских пород из стратегического направления в одно из наиболее привлекательных направлений в части добычи и монетизации углеводородов. Практически все основные транснациональные нефтяные компании проявили большой интерес в данном направлении. Развитию также способствовали стабильно высокие цены на нефть. Падающую добычу из традиционных коллекторов в США можно было заменить либо импортом, либо новыми видами ресурсов. Нефтематеринские бассейны в США оказались очень привлекательными в части добычи горизонтальными скважинами с ГРП. Толщины, свойства нефти, степень зрелости основных нефтематеринских бассейнов оказались наиболее благоприятными и оптимальными для добычи нефти. Наличие рынков сбыта в непосредственной близости к месторождениям сделало применение дорогих технологий рентабельным. В процессе ввода объектов добычи стоимость добычи начала снижаться, так как рынок услуг в части бурения и проведения МГРП являлся исключительно рыночным. Появление новых данных и набор опыта существенно снизило риски и стоимость работ. В промышленную стадию за несколько лет добычи были введены практически все основные бассейны с нефтематеринскими породами на территории США. Одновременно расширилась программа по опытно-промысловым работам в области добычи пиролитическими способами путем инициирования разложения керогена из нефтематеринских пород путем подачи теплоносителя [2]. В других странах рост добычи из нефтематеринских пород на начало сланцевой революции в США в 2009–2010 гг. не наблюдался. Однако произошел существенный рост геологоразведочных работ и опытно-промысловых испытаний.

Добыча нефти из нефтематеринских пород (сланцевая нефть) начала расти в США в 2009–2010 годы [3, 4]. На начало слан-

цевой революции добыча составляла не более 30 тыс. тонн в сутки. В первую очередь, в разработку были введены месторождения бассейна Баккен и Волфкамп. К 2015 году добыча достигла 700 тыс. тонн в сутки, а к 2020 году достигла 1,2 млн тонн в сутки. Бассейн Баккен в штате Северная Дакота также является важным для добычи сланцевого газа. Данный бассейн служил основным полигоном для испытания, опробования и развития технологий. На других бассейнах применялись уже готовые опробованные технологии. Добыча из бассейна Игл Форт в штате Техас до 2011 года не велась и за 4 года выросла до 200 тыс. тонн в сутки 2015 году. Данный бассейн также является одним из ключевых бассейнов добычи сланцевого газа [5].

Большинство бассейнов в США находятся на глубине 2000–3000 м с пластовой температурой в интервале 60–120 °С, где текущая степень зрелости относится к нефтегенерирующей стадии, или в «нефтяном окне». На меньших глубинах нефтематеринские породы, из-за более низких температур, не содержат жидких углеводородов, и вся органика содержится в твердом состоянии. На больших глубинах начинается «газовое окно», где за счет больших температур и более интенсивных пиролитических процессов органическое вещество преобразуется в более легкие газообразные углеводороды. Все бассейны со сланцевой нефтью, которые введены в промышленную эксплуатацию в США, являются морскими отложениями с органической материей планктонного происхождения. Это делает месторождения более однородными и монотонными в части геологических свойств породы и содержащейся в ней твердой и жидкой органики. По состоянию на 2023 год в США пробурено и введено в эксплуатацию более 36 тыс. скважин для добычи сланцевой нефти. Всего введено в промышленную разработку 12 бассейнов, при этом порядка 1/3 фонда скважин находятся в бассейне Баккен и 1/3 в бассейне Игл Форд. Наиболее продуктивным является бассейн Вольфкам с добычей порядка 0,5 тонн в сутки на метр горизонтального ствола или более 150 тонн в сутки на скважину в зависимости от длины горизонтального участка. В среднем по всему фонду скважин по всем бассейнам добыча составляет 0,15 тонн в сутки на метр или 50 тонн в сутки на скважину.

Последние 15 лет с началом сланцевой революции в США активно развивается сланцевая отрасль в Китае [6]. Осуществляются геологоразведочные и исследовательские работы. Промышленная добыча ведется в крайне ограниченном объеме в рамках расширенных опытных работ. Нефтематеринские бассейны в Китае значительно отличаются от бассейнов в США. Это в первую очередь озерные или прибрежные формирования в условиях неглубокого моря. Это делает геологическое строение более неоднородным, а органическое вещество с более низким потенциалом в части генерации нефти. Также степень зрелости многих бассейнов не достигла нефтегенерирующих условий, и вся органика находится в твёрдом состоянии. Наиболее перспективным является направление добычи пиролитическим способом путем закачки теплоносителя в виде перегретого пара для инициирования разложения керогена и его превращения в жидкие и газообразные углеводороды [7]. Другие методы, включая внутрипластовое горение, также рассматриваются. Добыча жидких углеводородов аналогичным способом, как в США, с применением горизонтальных скважин с МГРП, также применяется в ограниченных масштабах, где нефтематеринские породы достигли нефтяного окна. Площади участков, где содержатся жидкие углеводороды, являются ограниченными и непротяженными. Всего перспективными являются 7 бассейнов, где ведутся основные работы. Но исследования и испытания в основном направлены на разработку технологий добычи пиролитическими методами. Наибольшая добыча традиционными способами осуществляется в бассейне Ордос [8, 9]. Пробурено и введено в эксплуатацию 25 горизонтальных скважин с длиной горизонтальной секции 1500–2000 метров в рамках опытных работ. Характеристики являются малопривлекательными в части разработки из-за высокой неоднородности по вертикали и небольших толщин. Средние начальные добиты составляют всего 14 тонн/сутки и, по всей видимости, находятся значительно ниже рентабельности. На втором месте в части текущих уровней добычи находится бассейн Джингар. На месторождении активно развиваются технологии интегрированного проектирования с выявлением наилучших зон для бурения, применяя все доступные методы по-

иска. На третьем месте находится бассейн Бохай-Бей, на объекте также установлены рекорды в части достижения начальных промышленных дебитов порядка 100 тонн в сутки на единичных скважинах. Кроме опытно-промышленных работ на уже открытых бассейнах ведутся активные поиски новых нефтематеринских объектов на больших глубинах [10].

Активность в части разработки нефтематеринских пород также набирает обороты на Ближнем Востоке, в первую очередь в части добычи газа [11]. Существенными перспективными запасами нефтематеринских пород обладает Австралия. В Аргентине достигли промышленной стадии добычи сланцевого газа [12]. По итогам исследования, проведенного американской ассоциацией по геологии, было охарактеризовано в 41 странах мира за пределами США 95 бассейнов с нефтематеринскими породами с 137 объектами. Оцененные мировые технические извлекаемые запасы сланцевого газа составляют порядка 220 трлн м³. Технические извлекаемые запасы сланцевой нефти составляют порядка 50 млрд тонн, из которых $\frac{1}{4}$ приходится на РФ [13].

На территории РФ существует несколько бассейнов нефтематеринских пород. В пределах Западной Сибири нефтематеринской породой является верхнеюрский комплекс с несколькими свитами, включая баженовскую, абалакскую и тюменскую свиту [14–17]. Данный комплекс распространяется по всей площади Западной Сибири и является региональным репером. Это один из основных и самых масштабных нефтематеринских бассейнов в мире. Все углеводороды из традиционных месторождений нефти и газа в Западной Сибири происходят из верхнеюрских нефтематеринских пород. В центральной и южной части Западной Сибири нефтематеринские породы находятся на стадии нефтегенерации и содержат значительные объемы органики в жидком состоянии. Основным источником нефти всех традиционных объектов в центральной части Западной Сибири является баженовская свита. В северной части Западной Сибири баженовские нефтематеринские породы в основном находятся в стадии генерации газа, а тюменская свита является основным источником нефти в регионе в северной части Западной Сибири, включая полуостров

Ямал. Ключевым объектом для испытания технологий и ведением промышленной добычи нефти из нефтематеринских пород является одно месторождение в бортовой части Елизаровского прогиба Ханты-Мансийского района Ханты-Мансийского автономного округа Тюменской области. В данной работе проведен анализ добычи из данного месторождения с учетом особенностей добычи из нефтематеринских пород.

Описание процессов происходящих в нефтематеринских породах

Свойства нефтематеринских пород очень сильно отличаются от традиционных коллекторов. Для корректного прогнозирования добычи необходимо учитывать комплексную структуру порового пространства, неоднородность и разнообразность свойств. Нефтематеринские породы содержат органику в твёрдом и адсорбированном состоянии, что практически не встречается в обычных коллекторах либо не имеет существенного влияния.

В целом исследования свойств нефтематеринских пород относятся к геохимии, где многие подходы были заимствованы у исследования свойств углей [18]. Для нефтематеринских пород, в первую очередь, важно определить нефтегенерирующий потенциал. Кроме легкой жидкой подвижной нефти, нефтематеринские породы содержат отдельную битуминозную фракцию. Эта фракция является адсорбированной на поверхности твердого органического вещества и минералов [19, 20]. Адсорбированная органика является не подвижной и не принимает участие в разработке на первых этапах. В обычном состоянии не происходит обмен веществ между адсорбированной частью с жидкой, так как адсорбированная часть связана физическими связями.

Принципиальные отличия между традиционными (ловушки заполненные нефтью) и нефтематеринскими породами начинают проявляться при сравнении свойств флюидов по площади и по глубине. Нефтематеринские породы часто находятся на разной стадии зрелости в зависимости от местоположения по площади и по глубине. Степень зрелости очень зависит от истории залегания, включая

исторические температуры и другие особенности. Небольшие отличия в текущей и исторической температуре значительно меняют свойства, характер и состав органического вещества в жидком виде. По мере повышения температуры начинают образовываться более легкие углеводороды за счет расщепления связей. В зависимости от стадии зрелости на разных площадях меняются практически все свойства нефти, включая состав, газосодержание, плотность, вязкость, температура застывания и т. п.

Нефти содержат растворенную твердую органику. К растворенной твердой органике относятся асфальтены и смолы, которые в чистом виде являются твёрдыми веществами. В нефтематеринских породах значительная доля органики представлена именно этими фракциями, соответственно, их роль является существенной. Данные органические соединения являются слаборастворимыми, соответственно, большая часть этого материала остается в исходном твердом состоянии как часть породы.

Основная часть твердого органического вещества – керогена – не растворяется в жидких углеводородах ни при каких условиях без химической деструкции. Извлекать нерастворимые органические соединения из керогена невозможно традиционными методами. Нефтематеринские породы имеют размеры пор очень малого диаметра, которые на порядок меньше размера пор традиционных коллекторов. Это связано с высоким содержанием глин, которые имеют малые размеры частиц. Малые размеры пор создают высокую площадь контакта между твердой породой с керогеном и подвижной жидкой нефтяной фазой. Наличие большой площади контакта в совокупности с высоким содержанием твердых органических веществ создает все предпосылки для адсорбции большого объема различных нефтяных фракций на поверхности. Слой адсорбированной органики, как правило, имеет незначительную толщину по поверхности, но из-за большой площади объем становится очень существенным.

Адсорбируются в первую очередь вещества с повышенной полярностью и с функциональными кислородсодержащими группами. Соответственно, адсорбированные соединения будут более тяжелыми по сравнению с жидкой подвижной фракцией.

Материалы и методы исследований

Методика анализа добычи динамическим материальным балансом

Механизм извлечения газа или нефти из нефтематеринских пород несколько отличается от традиционных коллекторов. Каждая скважина, как правило, отбирает собственный объем газа или нефти в непосредственной близости. Действует только естественный упруго-напорный режим и практически отсутствует интерференция. Среднее пластовое давление в зоне отбора для таких коллекторов, как правило, не известно, так как для этого скважину необходимо остановить на длительный промежуток времени. Соответственно, традиционные методы оценки запасов материальным балансом не применимы из-за отсутствия соответствующих данных.

Для анализа извлекаемых запасов и характеристики разработки нефтематеринских пород разработан так называемый метод динамического материального баланса [21]. В методе используется давление на забое вместо пластового давления для расчета извлекаемых запасов аналитическим- графическим методом. Метод применим только для условий работы скважин в ограниченной области дренирования с истощением пластовой энергии. В этом случае режим скважины является псевдоустановившимся (полустационарный, semi-steady-state) с непрерывным снижением давления на границе участка. Динамика снижения давления на забое имеет прямое отношение к динамике снижения давления в зоне отбора и позволяет вывести фундаментальные зависимости. Впервые формула была приведена и успешно применена для анализа добычи газа из ограниченного объема с постоянным дебитом в условии псевдоустановившегося режима. Первая предложенная методика имела ограниченное практическое применение из-за того, что работает в очень узких условиях с постоянным дебитом. Первая более практическая методика была модификацией и могла применяться для условий добычи с меняющимся дебитом и режимом. Также методика может быть применена как для анализа добычи нефти, так и газа [22]. В целом методика разработана для анализа добычи из ограниченного объема, к чему относятся сланцевые нефти. Принцип методики, следующий [23]:

Общее снижение давления Δp определяется как разница текущего забойного давления p_i и начального пластового давления p_{wf} . Общее изменение давления Δp складывается из двух частей – изменение среднего пластового давления за счет разработки и истощения запасов, и разница давления между средним текущим пластовым давлением и забойным давлением за счет фильтрации флюидов к скважине:

$$\Delta p = p_i - p_{wf} = (p_i - \bar{p}) + (\bar{p} - p_{wf}).$$

Изменение среднего пластового давления выражается в виде зависимости доли накопленной добычи от начальных запасов в соответствии с классической формулой материального баланса:

$$(N \cdot \frac{B_{oi}}{C_o}) \cdot (p_i - \bar{p}) \cdot c_i = N_p \cdot B_o \rightarrow p_i - \bar{p} = \frac{S_o \cdot N_p}{N \cdot c_i \cdot \Delta p}.$$

Разница между средним пластовым давлением и давлением на забое формируется в виде классической формулы притока в зависимости от дебита и параметров, которые как правила не зависят от давления и представлены в виде константы:

$$\bar{p} - p_{wf} = \frac{11,57 \cdot B_o \mu}{k \cdot h} \cdot [\ln(\frac{r_e}{r_{wa}}) - \frac{3}{4}] \cdot q_o = b_{pss} \cdot p_s,$$

Объединив три формулы в одну получается следующая зависимость:

$$\frac{q_o}{\Delta p} = \frac{1}{N \cdot b_{pss}} - \frac{S_o \cdot N_p}{c_i \cdot \Delta p} \cdot \frac{1}{N \cdot b_{pss}},$$

где S_o – нефтенасыщенность;
 C_i – общая сжимаемость;
 N_p – накопленная добыча нефти;
 N – начальные запасы нефти;
 q_o – дебит нефти;
 p_i – начальное пластовое давление;
 p_{wf} – забойное давление;
 $\bar{p}$ – среднее текущее пластовое давление,
 B_o – объемный коэффициент нефти.

Построение графика $p_o/\Delta p$ против $S_o \cdot N_p / (c_i \cdot \Delta p)$ для работы скважины в замкнутом пространстве приведет к линейной зависимости, а пересекать линия ось Y будет в значении начальных геологических запасов в зоне отбора. Применение вышеописанного динамического материального баланса для оценки извлекаемых запасов также описано во временном методическом руководстве по подсчету запасов нефти в трещинных и трещинно-поровых коллекторах в отложениях баженовской толщи [24].

Метод имеет ряд погрешностей в связи с тем, что многие параметры, которые приняты константой, в действительности зависят от давления и степени выработки. В этой связи в целом метод имеет концептуальное применение с качественными выводами. Также методика практически не применима для анализа разработки в условиях появления газа в свободном состоянии ниже давления насыщения. Для таких особых условий эксплуатации существуют модифицированные более комплексные методы динамического материального баланса с использованием псевдодавления с вводом различных поправок и модификаций. Такие подходы не рассмотрены в данной работе. Прямолинейная зависимость образуется в случае псевдоустановившегося однофазного режима работы скважин в условиях ограниченного объема.

Наиболее простой подход, описанный выше, успешно был применён для обработки данных по добыче сланцевой нефти из месторождения Бохай-Бей в Китае из горизонтальных скважин с МГРП [25]. Авторы успешно применили методику и выявили режим работы скважин с добычей из трещиноватой среды и из низкопроницаемой матрицы с количественной оценкой запасов в каждой из этих сред в зоне отбора. Авторы предполагают, что при режиме добычи из трещиноватой среды фильтрация происходит из нескольких схожих по фильтрационным характеристикам сред:

- 1) из трещин ГРП с пропантом;
- 2) из трещин, которые образовались при проведении ГРП, но без пропанта и
- 3) естественных трещин, которые присутствуют в коллекторе.

При фильтрации и добыче нефти из трещин матрица в добыче не участвует, и этот период характеризуется и определя-

ется ограниченными запасами трещин. Данное предположение позволяет оценить запасы трещиноватой среды в зоне отбора в случае псевдоустановившимся режима. Добыча и фильтрация из низкопроницаемой матрицы начинается при достижении определенного градиента давления на поздней стадии по итогам истощения запасов трещин. На этом этапе формируется прямолинейная зависимость на графике с другим градиентом и другим пересечением оси Y в соответствии с объемами запасов матрица + трещина. В начале этапа фильтрации из матрицы, по мнению авторов, в разработку вступает матрица, которая находится в зоне и плоскости (площади) распространения трещин от ГРП. На последнем этапе, при определенных обстоятельствах, в разработку будут вступать удаленные области за пределами площади влияния ГРП. Каждый из этапов и стадий добычи представляет отдельную область с ограниченными запасами и может быть проанализирован представленной методикой, если в каждом этапе будет установлен определенный псевдоустановившийся режим. Для каждого режима формируется прямолинейная зависимость. В данной работе методика используется для анализа добычи одного объекта верхнеюрских нефтематеринских пород месторождения в Западной Сибири.

Основные характеристики и состояние разработки месторождения в Ханты-Мансийском районе

В период времени с середины 2000-х до начала 2010-х годов на верхнеюрские нефтематеринские пласты «объект Б» были пробурены наклонно-направленные скважины с целью осуществления добычи нефти на естественном режиме в рамках опытно-промышленных работ. Часть пробуренного в этот период фонда скважин по-прежнему находится в эксплуатации. На «объекте Б» также начат промышленный эксперимент по термогазовому воздействию с площадной закачкой воздуха в пласт с инициированием внутрипластового горения и организации фронта вытеснения продуктами горения. В настоящее время реализуется термогазовое воздействие на третьем участке «объекта Б». Результаты данного эксперимента и показатели скважин в зоне воздействия в этой работе

не рассмотрены. В конце 2018 года на месторождении началось интенсивное разбуривание с ростом объемов добычи нефти, которое продолжается в настоящее время. Фонд добывающих скважин на месторождении в 2023 году составил 300 ед. Все новые скважины являются горизонтальными с многостадийным ГРП. Технологии бурения в целом хорошо отработаны для этого месторождения и приносят стабильные положительные результаты. В первые месяцы после ввода в эксплуатацию скважины работают в фонтанном режиме, далее выполняется перевод на мех. добычу. В промышленную разработку также был введен второй «объект Т» верхнеюрского комплекса и третий объект доюрских отложений. В статье рассмотрены показатели работы только скважин с «объекта Б». На сегодняшний день большая часть месторождения разбурена. Работы по обустройству и вводу основных объектов подготовки нефти и попутного газа находятся на завершающей стадии. В настоящий момент завершается подготовка планов к вводу объектов верхнеюрского комплекса соседних месторождений и структур с аналогичными свойствами.

Свойства флюидов анализируемого «объекта Б» были хорошо изучены глубинными пробам в северной и в центральной зоне. При этом отдельные участки объекта, включая всю западную часть месторождения, не охвачены исследованиями PVT. Несмотря на то, что только центральная и северная части охвачены исследованиями PVT, свойства нефти имеют значительный разброс. В центральной части нефти являются более легкими с плотностью в стандартных условиях в среднем 820 кг/м^3 и вязкостью около 3 сПз в стандартных условиях. В северной части нефти являются более тяжелыми с плотностью в среднем около 830 кг/м^3 и вязкостью в стандартных условиях около 4 сПз. В пластовых условиях вязкость нефти составляет в среднем 0,6 сПз по всему объекту. Давление насыщения и газовый фактор также имеют значительный разброс и в среднем составляют 110 атм. и $100 \text{ м}^3/\text{тонн}$ по всему объекту соответственно. Нефти характеризуются крайне низким содержанием асфальтеновой фракции, массовая доля асфальтенов в среднем равна 0,3 % с максимальным значением 0,6 %. Доля смол в среднем составляет 5,2 % по массе и изменяется в пределах 3–7 %. Зоны с меньшей вязкостью и плотностью содержат меньше смолистых фракций. Со-

держание парафинов составляет в среднем 2,6% по массе. Также имеется большой разброс температуры застывания нефти. В зонах с меньшей плотностью минимальная температура застывания составляет -30°C при средней -26°C . В центральной части, где плотность немного выше, температура застывания в среднем составляет -23°C . Молекулярная масса товарной нефти находится в пределах 92–147 г/моль со средним значением 110 г/моль. Молекулярная масса растворенного газа находится в пределах 28–35 г/моль со средним значением 32 г/моль. Объемный коэффициент находится в диапазоне 1,135–1,538 со средним значением 1,36.

На нескольких скважинах был проведен комплекс геохимических исследований, включая стандартную оценку методом Rock-eval со следующими средними значениями: ТОС – 13,4 % масс, S1 – 6,5 мг УВ / г породы, S2 – 35 мг УВ / г породы, Tmax – 447°C , HI – 347 мг УВ / г ТОС. Объем органического вещества и потенциал генерации нефти за счет пиролиза в породе характеризуется как очень высокий.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ добычи динамическим материальным балансом

Всего проанализировано 8 вертикальных скважин, пробуренных в период 2008–2011, 2 горизонтальные скважины, пробуренные до 2018 года и 32 горизонтальные скважины с МГРП, пробуренные в период 2018–2022 гг. Анализировались только объекты основного нефтематеринского «объекта Б» верхнеюрского комплекса. Кусты, введенные в 2023 году, не анализировались из-за отсутствия достаточного количества данных и истории добычи. Также не анализировалась добыча по некоторым разведочным скважинам из-за отсутствия длительного стабильно периода добычи. Накопленная добыча была доступна ежемесячно, соответственно, данные по дебитам и давлениям усреднялись для каждого месяца. Все графики приведены в единый вид, где каждое значение соответствует одному месяцу работы скважины. По оси Y строится значение $q_o/\Delta p$, которое в данной работе называем приведенный дебит, а по оси X строится значение $S_o \cdot N_p / (c_i \cdot \Delta p)$ которое называем в данной работе приведенный отбор. Также при-

ведены графики динамики изменения дебита нефти и плотности нефти по времени.

Скважина вертикальная-1 эксплуатируется с начала промышленной непрерывной эксплуатации месторождения. Скважина находилась непрерывно в эксплуатации более 15 лет. Метод динамического материального баланса демонстрирует прямолинейную зависимость на протяжении всей истории разработки (рис. 1А). Это означает, что скважина дренировала один ограниченный объем с непроницаемыми границами в течение всего времени. Данная скважина позволяет провести определенные настройки и в этом смысле является особым эталонным случаем. Отсутствие ГРП и других ГТМ в процессе добычи также упрощает обработку и анализ данных. Скважина отобрала порядка 90 % от всех начальных извлекаемых запасов. Фактические отобранные объемы запасов позволяют настроить коэффициент общей сжимаемости c_t для получения корректного значения приведенного отбора по оси Y и корректного пересечения прямой оси Y при значении начальных извлекаемых запасов. Псевдоустановившийся режим с ограниченным объемом дренируемых запасов также хорошо прослеживается при анализе кривой падения добычи нефти (рис. 1Б).

Одна из первых пробуренных горизонтальных скважин горизонтальная-1 также демонстрирует стабильный режим. Скважина работала при другом режиме в начальный период в течение 4-х месяцев, дренируя ограниченные запасы в трещиноватой части в зоне отбора. Скважина отобрала более 90 % от всех начальных извлекаемых запасов и также является эталонной в части анализа и начальных настроек аналитической модели (рис. 2).

Одна из первых пробуренных горизонтальных скважин горизонтальная-1 также демонстрирует стабильный режим. Скважина работала при другом режиме в начальный период в течение 4-х месяцев, дренируя ограниченные запасы в трещиноватой части в зоне отбора. Скважина отобрала более 90 % от всех начальных извлекаемых запасов и также является эталонной в части анализа и начальных настроек аналитической модели (рис. 2).

В начале 2019 года началось интенсивное разбуривание месторождения, было введено много скважин. Большая часть

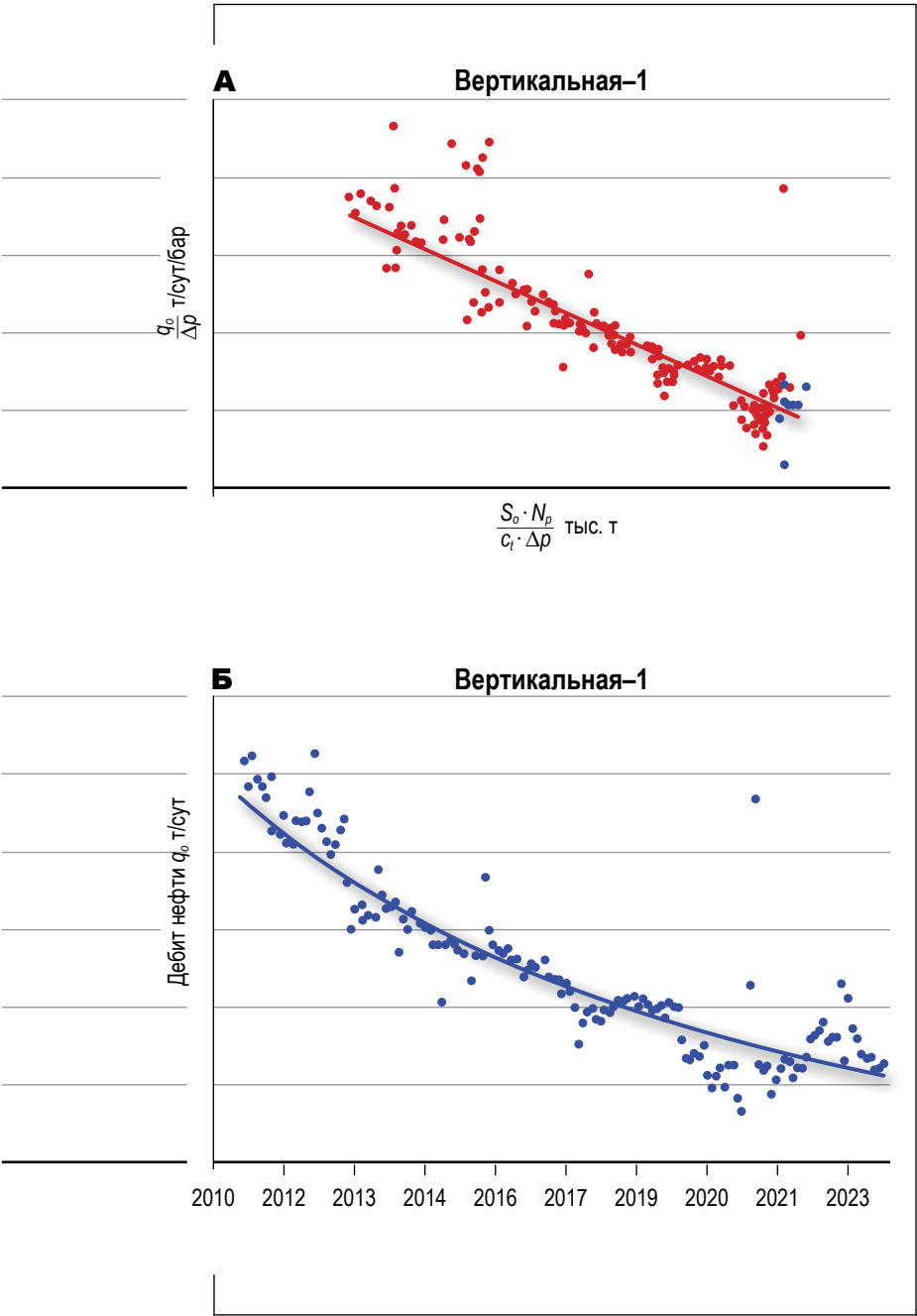


Рис. 1. Зависимость приведенного дебита нефти от приведенного отбора (А) и динамика дебита нефти (Б) скважины вертикальная-1 в северной части залежи.

Fig. 1. The dependence of the normalized oil flow rate vs normalized cumulative production (A) and the dynamics of the oil flow rate (B) of the Vertical-1 well in the northern part of the reservoir.

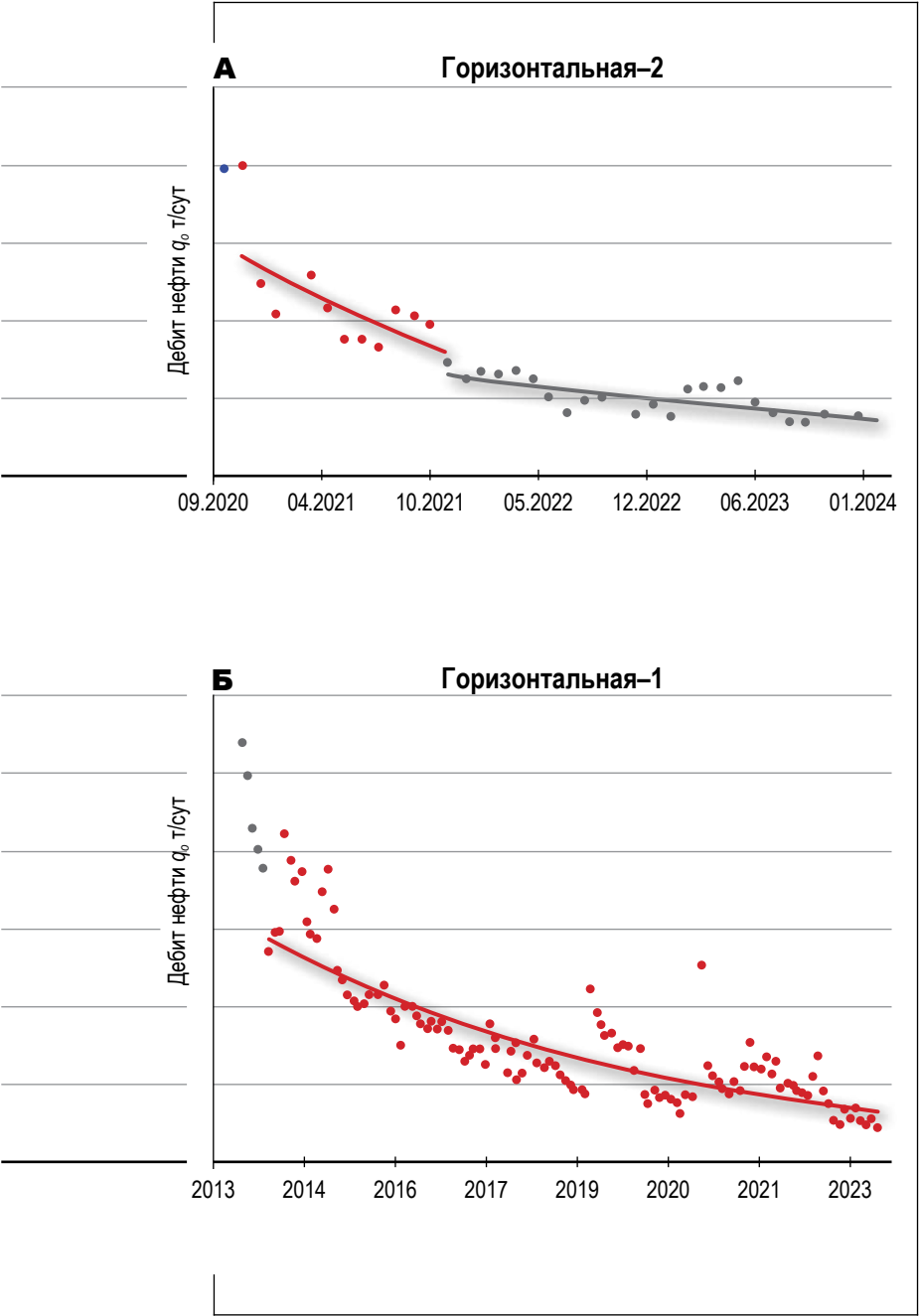


Рис. 2. Динамика дебита нефти (А) и зависимость приведенного дебита нефти от приведенного отбора (Б) скважины Горизонтальная-1 в центральной части залежи.
Fig. 2. The dynamics of the oil flow rate (A) and the normalized oil flow rate vs normalized cumulative production (B) of the Horizontal-1 well in the central part of the reservoir.

скважин достигла определенных стабильных режимов. Новые скважины были горизонтальные с МГРП. Большая часть скважин в первый период демонстрировала стабильный режим работы, дренируя запасы из трещиноватой части. Объем трещиноватого коллектора в зоне отбора относится к трещине с пропантом, вторичным трещинам в зоне ГРП без пропанта и естественным трещинам, которые примыкают к созданным искусственным трещинам. Данный режим характеризуется как режим с высоким дебитом с высоким темпом падения (рис. 3А), и установившийся режим в виде прямой зависимости на графике зависимости приведенного дебита нефти от приведенного отбора (рис. 3 Б). После завершения отбора нефти из трещиноватой части начинается режим отбора из матричной части. Данный переход прослеживается практически на всем фонде. При отборе из трещиноватой части матричная часть в разработке не участвует. Режим отбора из матричной части является более стабильным в части темпа падения дебитов и более продолжительным. Оба режима (отбора из трещин и матрицы) позволяют графически определить извлекаемые запасы в трещиноватой части и в матричной части в зоне отбора каждой скважины.

Скважины горизонтальная-4 и горизонтальная-5 работают на одной кустовой площадке в центральной части, скважины являются близнецами в части геологических свойств и в части объемов извлекаемых запасов из трещиноватой и матричной части по итогам проведенного анализа (рис. 4 А, Б). Соотношение запасов матричной части к трещиноватой части для обеих скважин составляет порядка 2 : 1. Продолжительность работы этих двух скважин не превышает двух с половиной лет.

По мере дренирования объемов и снижения давления режим работы может измениться и может начаться режим дополнительного притока нефти за счет десорбции или за счет притока из более удаленных частей за пределами зоны, которая подверглась воздействию ГРП.

Скважина горизонтальная-6 в южной части проработала более пяти лет. Скважина проработала с режимом трещины в течение одного года, далее последовал переходный период и стабильный

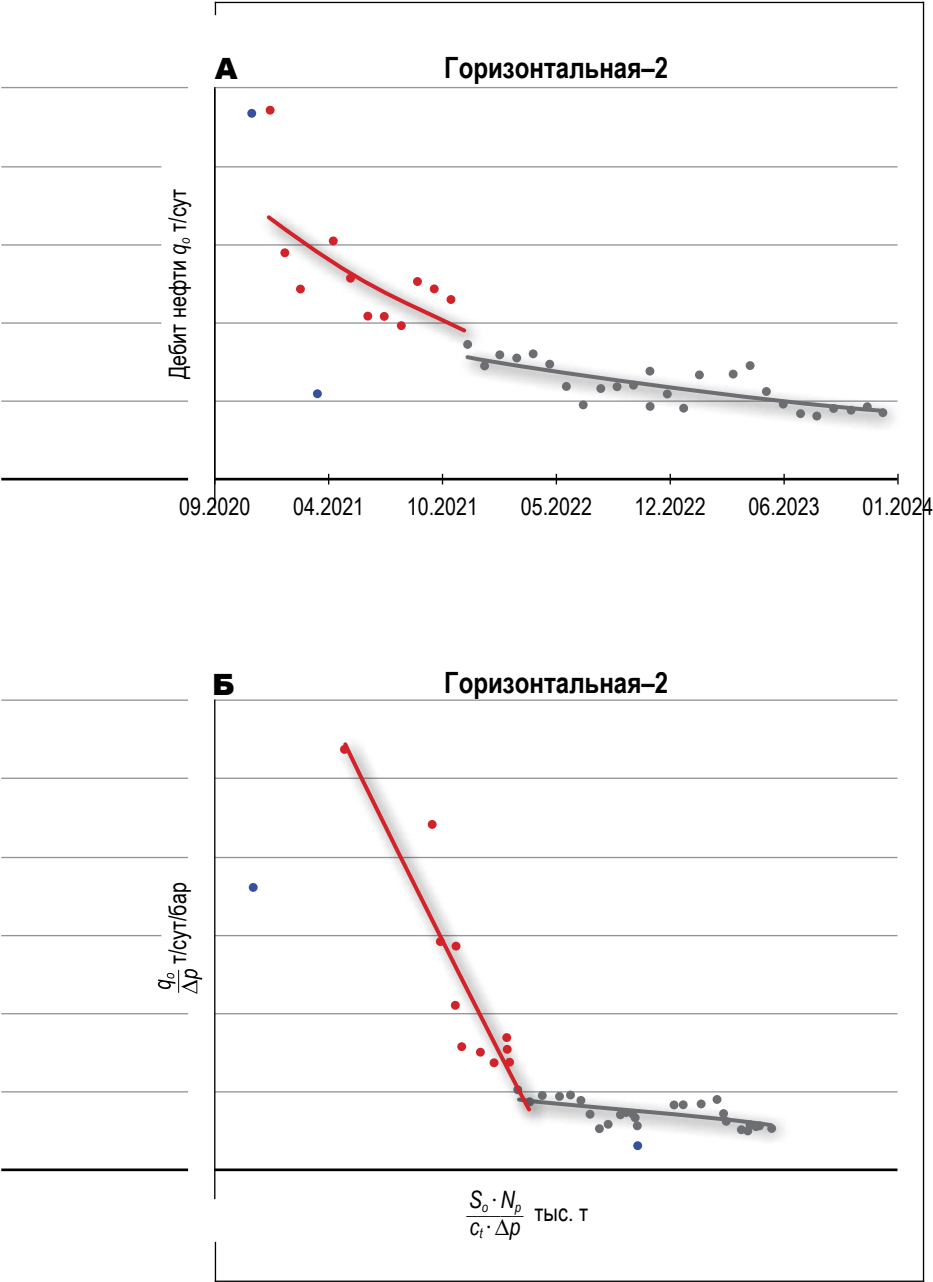


Рис. 3. Динамика дебита нефти (А) и зависимость приведенного дебита нефти от приведенного отбора (Б) скважины горизонтальная-2 в центральной части залежи.
Fig. 3. The dynamics of the oil flow rate (A) and the dependence of the normalized oil flow rate vs normalized cumulative production (B) of the Horizontal-2 well in the central part of the reservoir.

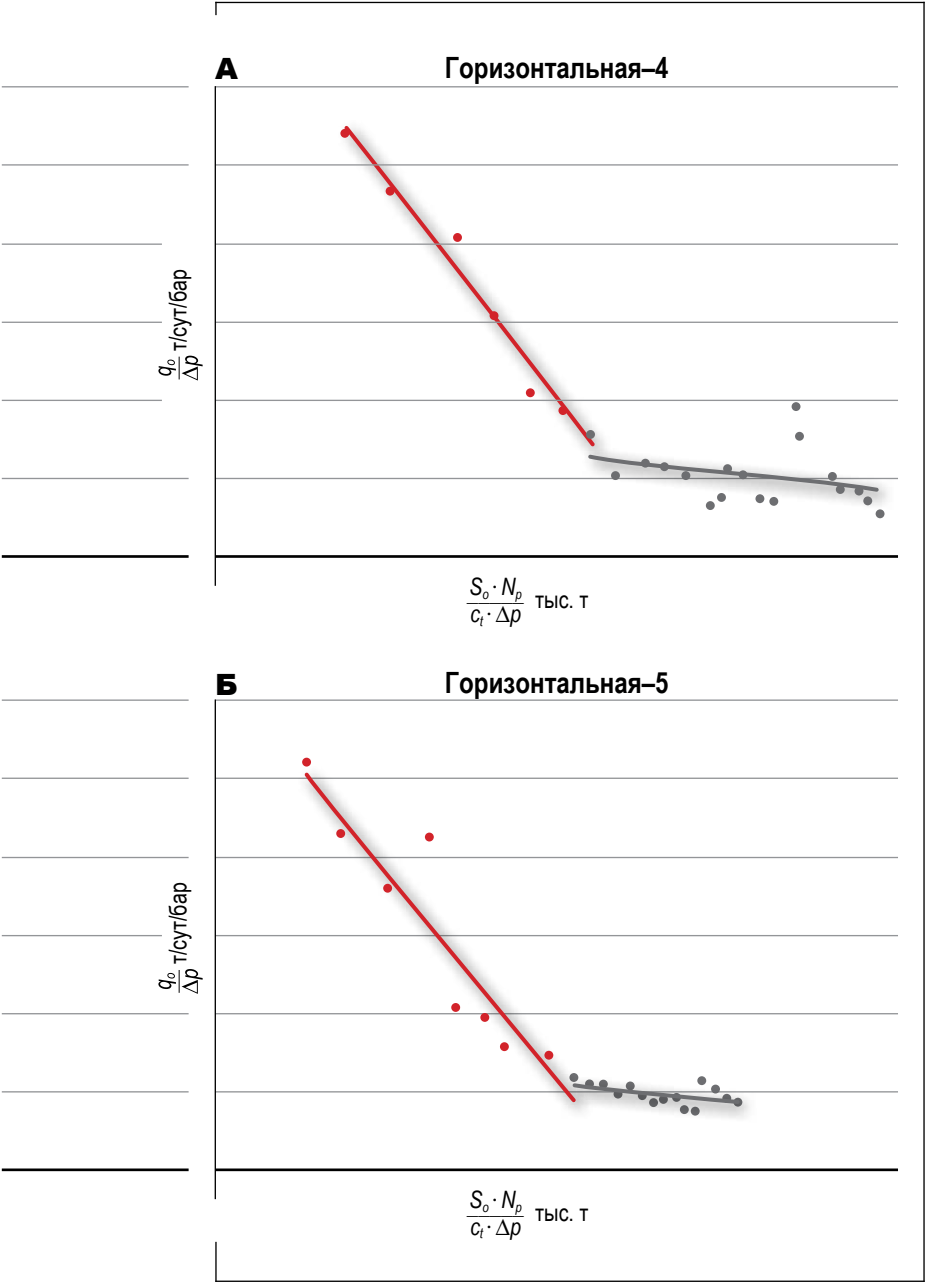


Рис. 4. Зависимость приведенного дебита нефти от приведенного отбора соседних двух скважин в центральной части скважины горизонтальная-4 (А) и зависимость приведенного дебита нефти от приведенного отбора соседних двух скважин в центральной части скважины горизонтальная-5 (Б). Fig. 4. The dependence of the normalized oil flow rate vs normalized cumulative production of the adjacent two wells in the central part of the well is Horizontal-4 (A) and the dependence of the normalized oil flow rate vs normalized cumulative production of the adjacent two wells in the central part of the well is Horizontal-5 (B).

период дренирования ограниченного объема из матричной части в течение 1,5 лет (рис. 5). Оба периода также имеют соответствующий характерный темп падения (рис. 6 А). После завершения второго периода начался еще один переходный период с выходом на новый третий псевдоустановившимся режим работы с ограниченными запасами и областью дренирования. Переход на третий режим соответствует росту дренируемых запасов на 10% относительно запасов, которые были на втором матричном режиме. Не имея дополнительных данных, третий режим можно было бы отнести к режиму подключений удаленной области в качестве дополнительной подпитки. Однако наличие данных по росту плотности добываемой нефти (рис. 6 Б) говорит о том, что данный режим относится именно к режиму дополнительного десорбционного притока. Более вязкие фракции, ранее структурно связанные с твердым керогеном, становятся подвижными за счет снижения давления и других изменений в поровом пространстве и разрушения связывающих физических связей.

Аналогичная ситуация наблюдается на скважинах горизонтальная-7 в западной части, где после продолжительного периода работы в нестационарном режиме произошел переход на аналогичный режим с ростом дренируемых запасов на 10 % и сопутствующим ростом плотности пластовой продукции (рис. 7 А, Б).

Новые скважины на новых кустовых площадках, введенных с 2019 года, вводились примерно в одно время с небольшим интервалом времени. Это позволяет построить график динамики плотности нефти от начала ввода в эксплуатацию, группируя кустовые площадки в соответствующие площади месторождения (рис. 8). Плотность нефти соответствует оперативным замерам проб. Свойства флюидов очень сильно отличаются по площади. Западная часть имеет наименьшую плотность нефти, равную 817 кг/м^3 , которая существенно меньше, чем плотность отобранных проб PVT центральной и северной части. В западной части нет проб PVT. Данные свидетельствуют о том, что в этой зоне присутствуют другие более легкие нефти. Более легкие нефти могут образовываться в случае, если в данной области кероген имеет более высокую степень зрелости. В этом случае также будет образо-

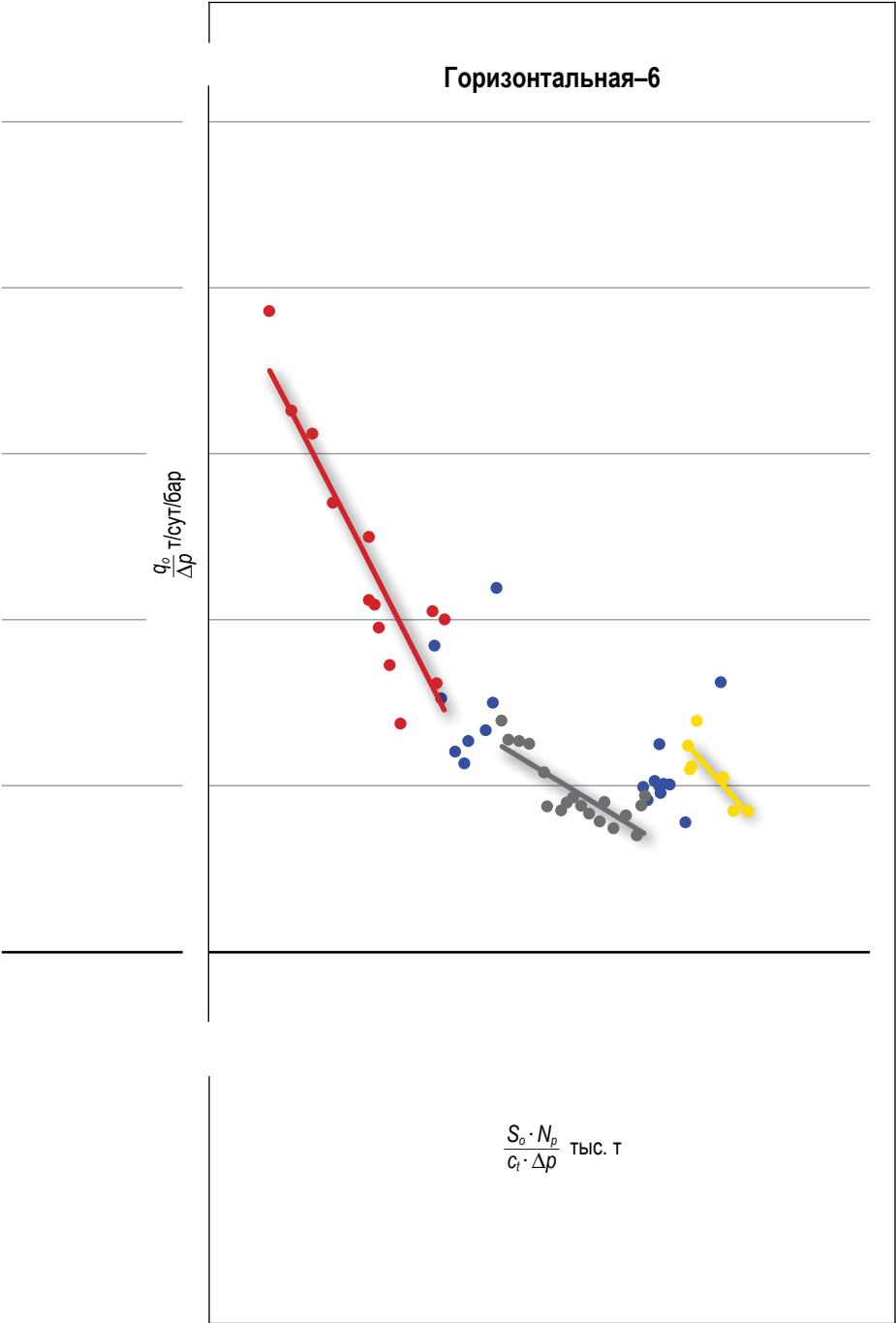


Рис. 5. Зависимость приведенного дебита нефти от приведенного отбора скважины горизонтальная-6 в южной части.
Fig. 5. The dependence of the normalized oil flow rate vs normalized cumulative production well Horizontal-6 in the southern part.

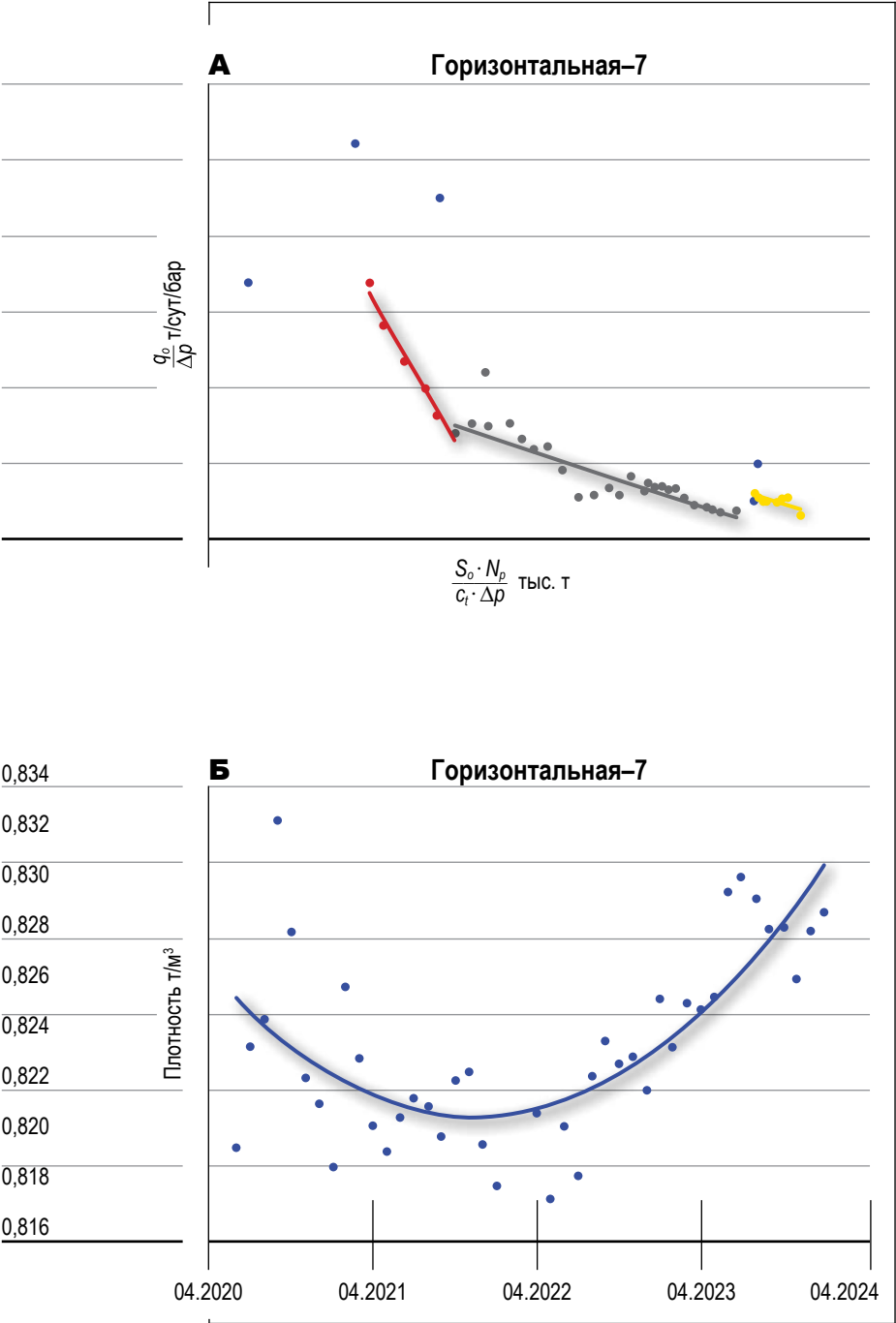


Рис. 7. Зависимость приведенного дебита нефти от приведенного отбора (А) и динамика плотности продукции (Б) скважины горизонтальная-7 в западной части. Fig. 7. The dependence of the normalized oil flow rate vs normalized cumulative production (A) and the dynamics of the production density (B) of the Horizontal-7 well in the western part.

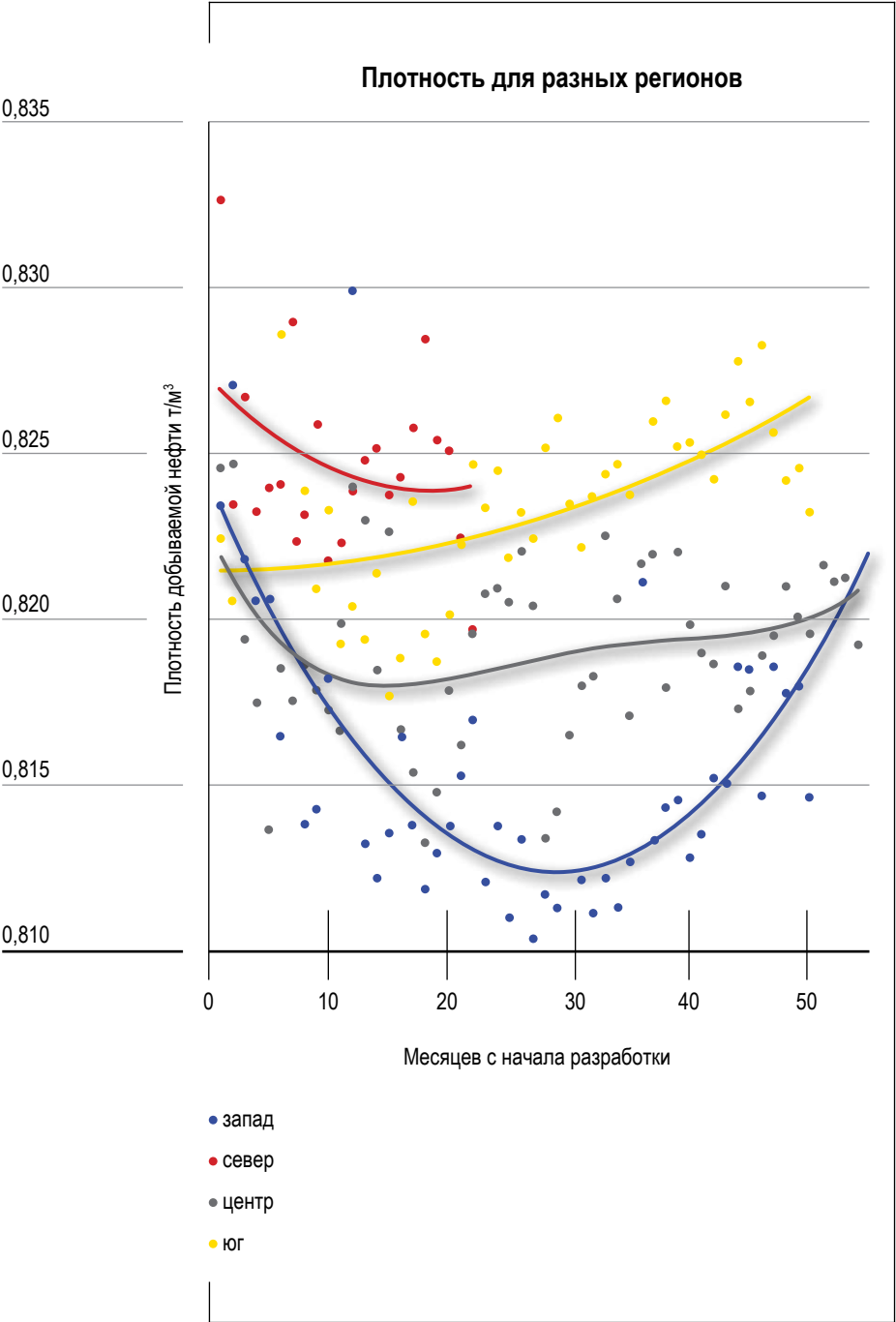


Рис. 8. Динамика плотности добываемой продукции для основных площадей.
Fig. 8. Dynamics of the density of produced products for the main areas.

вываться большой объем жидкой нефти. Данное обстоятельство также косвенно подтверждается наличием длительного, до 15 месяцев, периодом фонтанного режима. При этом фонтанный режим в других областях не превышает 3–4 месяцев. Длительное фонтанирование возможно только при наличии избыточного пластового давления, которое возникает при разложении керогена в жидкое и газообразное состояние. В западной части также происходит значительный рост плотности продукции во всех скважинах в процессе разработки. Данный рост плотности делает более контрастным переход на режим с дополнительной подпиткой нефти за счет десорбционных процессов. Плотности добываемой продукции в других областях соответствуют значениям проб PVT, что подтверждает правильность этих оперативных данных. В центральной части плотность нефти слабо меняется в процессе разработки. В южной части плотность имеет небольшую тенденцию к росту по мере разработки. Ожидается, что в центральной части десорбционный режим будет иметь ограниченный и непродолжительный характер.

Выводы, рекомендации и дальнейшее исследование

Для обработки данных добычи из нетрадиционных нефтематеринских пород был применен метод динамического материального баланса. Алгоритм был опробован ранее на других аналогичных месторождениях и впервые применялся для обработки данных добычи верхнеюрских нефтематеринских пород месторождения в Ханты-Мансийском районе. Метод позволил выделить режимы и продолжительность работы скважин при дренировании ограниченного объема из трещин и из матричной части. Определены объемы извлекаемых запасов в трещиноватой части и матричной части для каждой скважины, где установился соответствующий псевдоустановившийся режим. Обработка данным методом в совокупности с данными динамики плотности добываемой нефти позволила определить отдельный третий псевдоустановившийся режим работы скважины с на более поздней этапе с ростом плотности.

Исследования в данном направлении были инициированы началом осложнений добычи на рассмотренном объекте. Послед вводом новых скважин и отработки на фонтанном режиме в определенный момент происходит рост давления в линиях сбора. В отдельных случаях в линиях сбора происходило перекрытие сечения отложениями. В момент возникновения осложнений на нововведенных скважинах были отобраны и проанализированы пробы. На проблемных участках пробы имели повышенную вязкость нефти и повышенную температуру застывания. Состав проб также был крайне необычный, содержание асфальтенов составляло 1,3 % при среднем содержании всех проб PVT равным 0,3 %.

Сформулированные новые гипотезы дают повод для увеличения исследовательских работ и в других направлениях. Ранее были сформулированы новые алгоритмы и инструменты для определения петрофизических свойств нефтематеринских пород включая определение количества (насыщенности) жидкой, адсорбированной и твердой органики [26]. Так как информация об объеме и характере каждой из этих фракций несет коммерческий интерес, то требования к точности приборов и к алгоритму должны возрасти. Для повышения точности потребуется программа лабораторных работ, так как имеются определенные сложности привязки данных каротажа к керну из-за различных систем ошибок прибора Rock-eval, которые детально описаны в этой работе. Если часть твердой органики является извлекаемой за счет десорбции, то потребуется внесение изменений и в методы подсчета геологических и извлекаемых запасов. Этим направлением занимаются ведущие специалисты отрасли [27, 28]. При этом извлекаемые запасы в соответствии с методическими рекомендациями [29] рассчитываются по методу темпа падения. Расчет дренируемых извлекаемых запасов с использованием темпа падения учитывает только запасы, вовлеченные в разработку на момент оценки, и не учитывает объемы, которые будут вовлечены позже. Например, рассчитывая извлекаемые запасы при использовании темпа падения на ранней стадии, когда дренируются только объемы трещиноватой части, не будут учитывать объемы матричной части, которые вступают в разработку позже.

Процесс десорбции битуминозной фракции является достаточно сложным процессом и механизм вовлечения битуминозных фракций в добычу, вероятно, основан на ряде совокупных факторов включая снижение давления, расширение флюидов, растрескивание породы за счет депрессии и взаимодействие породы с флюидами ГРП. Образование микротрещин будет способствовать десорбции за счет снижения площади контакта между породой и флюидом. Исследование и расчеты процессов адсорбции [30] на молекулярном уровне продемонстрировали, что адсорбционные характеристики слабо зависят от давления. Однако адсорбционные характеристики сильно зависят от геометрии порового пространства и от размера пор. Поры сферической формы, будут содержать в два раза больше адсорбированной органики по сравнению со щелевидными порами одинакового размера. Вертикальные скважины без ГРП не демонстрируют какие-либо изменения режима и подключения новых запасов в разработку. Флюиды, которые поступают в пласт при процессе ГРП способны одномоментно освободить существенный объем битуминозной фракции. На некоторых скважинах именно в первые месяцы добычи наблюдается максимальное значение плотности (рис. 8) с последующим снижением. Проникновение флюидов ГРП в матрицу возможно будет способствовать снижению необходимой энергии для десорбции и переходу битуминозной фракции в свободное состояние в процессе разработки. Давление при ГРП будет существенно менять структуру порового пространства и возможно именно этот фактор является наиболее существенным. Недостаток легкой органики для транспортировки битуминозной части скорее является основным ограничивающим фактором. Одним важным технологическим направлением является получение дополнительной нефти из нефтематеринских пород путем циклической закачки углеводородных растворителей [31]. Растворители из лёгких углеводородов закачиваются под высоким давлением и могут включать дополнительные поверхностно активные вещества для высвобождения органики из матричной части. Этап добычи сопровождается резким сбросом давления. Все технологические аспекты в описаниях патента не пере-

числены, но не исключают и десорбционные процессы. В любом случае для достижение заявленных показателей (до пятикратного роста извлекаемых запасов) требуется вовлечение всех нефтяных органических соединений в добычу включая адсорбированную битуминозную фракцию.

Явления, связанные с появлением дополнительных битуминозных фракции в добычи, также можно объяснить и другим способом. Битуминозные и газовые соединения могут образовать отдельные соединения за счет так называемого эффекта «вспененной нефти». Это явление также описано в литературе [32] для высоковязких нефтей, но это является новым направлением для такого вида коллектора.

Список источников

1. Rodhan M. A. The Effect of US Shale Oil Production on Local and International Oil Markets // *International Journal of Energy Economics and Policy*. 2024. Vol. 13. No. 4. <https://doi.org/10.32479/ijeep.14455>
2. Liu S., Gai H., Cheng P. Technical Scheme and Application Prospects of Oil Shale In Situ Conversion: A Review of Current Status // *Energies*. 2023. No. 16 (11). <https://doi.org/10.3390/en16114386>
3. Sorkhabi R., Panja P. Not All Shales Play the Same Game: Comparative Analysis of US Shale Oil Formations by Reverse Engineering and Petroleum Systems // *Unconventional Resources Technology Conference (URTeC)*. 2021. <https://doi.org/10.15530/urtec-2021-5660>
4. Sorkhabi R., Panja P., Deo M. Production Sweet Spots of Eight US Shale Plays Constrained by Data Analytics of Normalized Production Index, Payzone Depth, and Initial GOR // *Unconventional Resources Technology Conference (URTeC)*. 2023. <https://doi.org/10.15530/urtec-2023-3866019>
5. Hou L., Zou C., Yu Z., Luo X., Wu S., Zhao Z., Lin S., Yang Z., Zhang L., Wen D., Cui J. Quantitative assessment of the sweet spot in marine shale oil and gas based on geology, engineering, and economics: A case study from the Eagle Ford Shale, USA // *Energy Strategy Reviews*. 2021. Vol. 38. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100713>

6. Wang X., Zhang G., Tang W., Wang D., Wang K., Liu J., Du D. A review of commercial development of continental shale oil in China. // *Energy Geoscience*. 2022. Vol. 3. P. 282–289. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2022.03.006>
7. Kang Z., Zhao Y., Yang D., Tian L., Li X. A pilot investigation of pyrolysis from oil and gas extraction from oil shale by in-situ superheated steam injection // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021. Vol. 196. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108101>
8. Lei Q., He Y., Guo Q., Dang Y., Huang T., Liu C. Technological issues in shale oil development using horizontal wells in Ordos Basin, China // *Journal of Natural Gas Geoscience*. 2023. Vol. 8. P. 377–387. <https://doi.org/10.1016/j.jnggs.2023.11.001>
9. Yonghong H., Ting X., Zhen L., Xiaohu B., Jianming F., Xuze Z. Development technologies for Triassic Chang 7 shale oil in Ordos Basin: A case study of Qingcheng Oilfield, W China // *Petroleum exploration and development*. 2018. Vol. 3. P. 321–337. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(24\)60477-5](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(24)60477-5)
10. Zhu G., Cao Y., Yan L., Yang H., Sun C., Zhang Z., Li T., Chen Y. Potential and favorable areas of petroleum exploration of ultra-deep marine strata more than 8000 m deep in the Tarim Basin, Northwest China // *Journal of Natural Gas Geoscience*. 2018. Vol. 3. P. 321–337. <https://doi.org/10.1016/j.jnggs.2018.12.002>
11. Mangha V.O., Lazreq N. Future Proofing the Development of Unconventional Resources in UAE // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference to be held in Abu Dhabi. 2021. SPE-207906-MS. <https://doi.org/10.2118/207906-MS>
12. Mosquera A., Buchanan A., Veiga R., Galan A., Olmos S., Lopasso A., Villar H. Vaca Muerta – Los Molles Multiple Formation Landing Zone Sweetspots, an Emerging Frontier Play for Unconventional Shale Exploration. Puesto Parada (Vaca Muerta)-Punta Senillosa (Los Molles) Discoveries Case Study, Southern Neuquen Basin // Latin America Unconventional Resources Technology Conference. 2023. URTEC-2023-3971660-MS. <https://doi.org/10.15530/urtec-2023-3971660>
13. World Shale Gas and Shale Oil Resource Assessment Technically Recoverable Shale Gas and Shale Oil Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside

the United States // Prepared By: Advanced Resources International, Inc Prepared for: U.S. Energy Information Administration U.S. Department of Energy EIA/ARI. 2013. URL: www.eia.gov

14. Ulmishek G. F. Petroleum Geology and Resources of the West Siberian Basin, Russia // U.S. Geological Survey Bulletin 2201-G. 2004. URL: <https://pubs.usgs.gov/bul/2201/G/B2201-G.pdf> (accessed: 11.01.2025).
15. Kontorovich A. E., Moskvina V. I., Bostrikov O. I., Danilova V. P., Fomin A. N., Fomichev A. S., Kostyreva E. A., Melenevsky V. N. Main oil source formations of the West Siberian Basin // Petroleum Geoscience. 1997. Vol. 3. P. 343–358. <https://doi.org/10.1144/petgeo.3.4.343>
16. Peters K. E., Kontorovich A. E., Moldowan J. M., Andrushevich V. E., Huizinga B. J., Demaison G. J., Stasova O. F. Geochemistry of selected oils and rocks from the central portion of the West Siberian basin Russia // AAPG Bulletin. 1993. No. 77 (5). P. 863–887. <https://doi.org/10.1306/BDFF8D80-1718-11D7-8645000102C1865D>
17. Liu Z., Moldowan J.M., Nemchenko-Rovenskaya A., Peters K.E. Oil families and mixed oil of the North–Central West Siberian Basin, Russia // AAPG Bulletin. 2016. № 100(03). P. 319–343. <https://doi.org/10.1306/12111514199>
18. Espitalie J., Madec M., Tissot B., Mennig J. J., Leplat P. Source Rock Characterization Method for Petroleum Exploration // Offshore Technology Conference, Houston, Texas. 1977. OTC-2935-MS. <https://doi.org/10.4043/2935-MS>
19. Mi S., Guo Q., Zhang Q., Wang J. Classification and potential of continental shale oil resources in China and resource evaluation methods and criteria // Oil Shale. 2023. No. 40(4). P. 283–320. <https://doi.org/10.3176/oil.2023.4.02>
20. Wang S., Feng Q., Javadpour F., Xia T., Li Z. Oil adsorption in shale nanopores and its effect on recoverable oil-in-place // International Journal of Coal Geology 2015. Vol. 147–148. P. 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.06.002>
21. Mattar L., McNeil R. The “Flowing” Gas Material Balance// J Can Pet Technol. 1998. No. 37 (02). PETSOC-98-02-06. <https://doi.org/10.2118/98-02-06>
22. Mattar L., Anderson D., Stotts G. Dynamic Material Balance. Oil or Gas-in-Place Without Shut-Ins // J Can Pet Technol. 2005. No. 45 (11). P. 113. <https://doi.org/10.2118/06-11-TN>

23. Stalgorova E., Matta L. Analytical Methods for Single-Phase Oil Flow: Accounting for Changing Liquid and Rock Properties // SPE Europec featured at 78th EAGE Conference and Exhibition held in Vienna. 2016. SPE-180139-MS. <https://doi.org/10.2118/180139-MS>
24. Временное методическое руководство по подсчету запасов подвижной нефти трещинных и трещинно-поровых коллекторов сланцевого типа // Недропользование XXI век. 2017. № 3 (60). С. 47–69. EDN WHBISD.
25. Guan Q., Chen C., Pu X., Wan Y., Xu J., Zeng H., Jia C., Gao H., Yang W., Peng Z. Production performance analysis of a continental shale oil reservoir in Bohai Bay basin // Petroleum. Available online 29/11/2023. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2023.11.002>
26. Мельников Л., Мартынов М., Демин В., Черевко М., Зарай Е. и др. Выделение потенциально-продуктивных интервалов и детальное изучение петрофизических свойств нефтематеринских пород отложений баженовской свиты с помощью специального комплекса ГИС // Российская нефтегазовая техническая конференция SPE, 26–28 октября, 2015, Москва, Россия. <https://doi.org/10.2118/176698-MS>
27. Гутман И. С., Потемкин Г. Н., Балабан И. Ю., Постников А. В., Постникова О. В. и др. Контрольные функции объемного метода при оценке ресурсов углеводородов с применением лабораторных геохимических измерений // Нефтяное хозяйство. 2016. С. 12–17. URL: <https://istina.msu.ru/publications/article/249468630/> (дата обращения: 12.01.2025).
28. Немова В. Д. Ключевые аспекты эффективности технологии извлечения сорбированных углеводородов нефтематеринских пород // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2020. Т. 15. № 1. https://doi.org/10.17353/2070-5379/1_2020
29. Алексеев А. Д., Браткова В. Г., Гутман И. С., Дёмин В. Ю., Карпов В. Б. и др. Методические рекомендации по подсчету запасов нефти в отложениях баженовского горизонта Западно-сибирской нефтегазоносной провинции // Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. <https://www.gkz-rf.ru/>
30. Wang S., Feng Q., Javadpour F., Xia T., Li Z. Oil adsorption

in shale nanopores and its effect on recoverable oil-in-place // International Journal of Coal Geology. 2015. Vol. 147–148. P. 9–24. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.06.002>

31. Downey R.A. System and method for optimized production of hydrocarbons from shale oil reservoirs via cyclic injection // US11851997B2. Date of patent 26.12.2023.
32. Иванов Д. А., Гудошников А. С., Маркес Р. Особенности разработки блока месторождения сверхвязкой, сверхтяжелой нефти на естественном режиме вытеснения (нефтяной пояс Ориноко) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2024. Т. 19. № 3. URL: https://www.ngtp.ru/rub/2024/26_2024.html (дата обращения: 12.01.2025).

References

1. Rodhan MA. The Effect of US Shale Oil Production on Local and International Oil Markets. International Journal of Energy Economics and Policy. International Journal of Energy Economics and Policy. 2024;(13):4. <https://doi.org/10.32479/ijeep.14455>
2. Liu S, Gai H, Cheng P. Technical Scheme and Application Prospects of Oil Shale In Situ Conversion: A Review of Current Status. Energies, 2023;(16)11. <https://doi.org/10.3390/en16114386>
3. Sorkhabi R, Panja P. Not All Shales Play the Same Game: Comparative Analysis of US Shale Oil Formations by Reverse Engineering and Petroleum Systems. Unconventional Resources Technology Conference (URTeC). 2021. <https://doi.org/10.15530/urtec-2021-5660>
4. Sorkhabi R, Panja P, Deo M. Production Sweet Spots of Eight US Shale Plays Constrained by Data Analytics of Normalized Production Index, Payzone Depth, and Initial GOR. Unconventional Resources Technology Conference (URTeC). 2023. <https://doi.org/10.15530/urtec-2023-3866019>
5. Hou L, Zou C, Yu Z, Luo X, Wu S, Zhao Z, Lin S, Yang Z, Zhang L, Wen D, Cui J. Quantitative assessment of the sweet spot in marine shale oil and gas based on geology, engineering, and economics: A case study from the Eagle Ford Shale, USA. Energy Strategy Reviews. 2021;(38). <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100713>
6. Wang X, Zhang G, Tang W, Wang D, Wang K, Liu J, Du D. A review of commercial development of continental shale oil

- in China. *Energy Geoscience*. 2022;(3):282-289. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2022.03.006>
7. Kang Z, Zhao Y, Yang D, Tian L, Li X. A pilot investigation of pyrolysis from oil and gas extraction from oil shale by in-situ superheated steam injection. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2021;(196). <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108101>
 8. Lei Q, He Y, Guo Q, Dang Y, Huang T, Liu C. Technological issues in shale oil development using horizontal wells in Ordos Basin, China. *Journal of Natural Gas Geoscience*. 2023;(8):377-387. <https://doi.org/10.1016/j.jnggs.2023.11.001>
 9. Yonghong H, Ting X, Zhen L, Xiaohu B, Jianming F, Xuze Z. Development technologies for Triassic Chang 7 shale oil in Ordos Basin: A case study of Qingcheng Oilfield, W China. *Petroleum exploration and development*. 2018;(3):321-337. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(24\)60477-5](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(24)60477-5)
 10. Zhu G, Cao Y, Yan L, Yang H, Sun C, Zhang Z, Li T, Chen Y. Potential and favorable areas of petroleum exploration of ultra-deep marine strata more than 8000 m deep in the Tarim Basin, Northwest China. *Journal of Natural Gas Geoscience*. 2018;(3):321-337. <https://doi.org/10.1016/j.jnggs.2018.12.002>
 11. Mangha VO, Lazreq N. Future Proofing the Development of Unconventional Resources in UAE. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference to be held in Abu Dhabi. 2021. SPE-207906-MS. <https://doi.org/10.2118/207906-MS>
 12. Mosquera A, Buchanan A, Veiga R, Galan A, Olmos S, Lopasso A, Villar H. Vaca Muerta – Los Molles Multiple Formation Landing Zone Sweetspots, an Emerging Frontier Play for Unconventional Shale Exploration. Puesto Parada (Vaca Muerta)-Punta Senillosa (Los Molles) Discoveries Case Study, Southern Neuquen Basin. Latin America Unconventional Resources Technology Conference. 2023. URTEC-2023-3971660-MS. <https://doi.org/10.15530/urtec-2023-3971660>
 13. World Shale Gas and Shale Oil Resource Assessment Technically Recoverable Shale Gas and Shale Oil Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States. Prepared By: Advanced Resources International, Inc Prepared for: U.S. Energy Information Administration U.S. Department of Energy EIA/ARI. 2013. www.eia.gov

14. Ulmishek GF. Petroleum Geology and Resources of the West Siberian Basin, Russia. U.S. Geological Survey Bulletin 2201-G. 2004. Available from: <https://pubs.usgs.gov/bul/2201/G/B2201-G.pdf> [Accessed 11 January 2025].
15. Kontorovich AE, Moskvina VI, Bostrikov OI, Danilova VP, Fomin AN, Fomichev AS, Kostyreva EA, Melenevsky VN. Main oil source formations of the West Siberian Basin. *Petroleum Geoscience*. 1997;(3):343-358. <https://doi.org/10.1144/pet-geo.3.4.343>
16. Peters KE, Kontorovich AE, Moldowan JM, Andrusevich VE, Huizinga BJ, Demaison GJ, Stasova OF. Geochemistry of selected oils and rocks from the central portion of the West Siberian basin Russia. *AAPG Bulletin*. 1993;7(5): 863-887. <https://doi.org/10.1306/BDFF8D80-1718-11D7-8645000102C1865D>
17. Liu Z, Moldowan JM, Nemchenko-Rovenskaya A, Peters KE. Oil families and mixed oil of the North–Central West Siberian Basin, Russia. *AAPG Bulletin* 2016;(100)03:319-343. <https://doi.org/10.1306/12111514199>
18. Espitalie J, Madec M, Tissot B, Mennig JJ, Leplat P. Source Rock Characterization Method for Petroleum Exploration. Off-shore Technology Conference, Houston, Texas. 1977. OTC-2935-MS. <https://doi.org/10.4043/2935-MS>
19. Mi S, Guo Q, Zhang Q, Wang J. Classification and potential of continental shale oil resources in China and resource evaluation methods and criteria. *Oil Shale*. 2023;40(4):283-320. <https://doi.org/10.3176/oil.2023.4.02>
20. Wang S, Feng Q, Javadpour F, Xia T, Li Z. Oil adsorption in shale nanopores and its effect on recoverable oil-in-place. *International Journal of Coal Geology* 2015;9(24):147-148. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.06.002>
21. Mattar L, McNeil R. The “Flowing” Gas Material Balance. *J Can Pet Technol*. 1998;37(02). PETSOC-98-02-06. <https://doi.org/10.2118/98-02-06>
22. Mattar L, Anderson D, Stotts G. Dynamic Material Balance. Oil or Gas-in-Place Without Shut-Ins. *J Can Pet Technol*. 2005;(45)11:113. <https://doi.org/10.2118/06-11-TN>
23. Stalgorova E, Matta L. Analytical Methods for Single-Phase Oil Flow: Accounting for Changing Liquid and Rock Properties. SPE Europec featured at 78th EAGE Conference and Exhibition held in Vienna. 2016. SPE-180139-MS. <https://doi.org/10.2118/180139-MS>

24. Vremennoye metodicheskoye rukovodstvo po podschetu zasposov podvishnoy nefti treshchinnykh i treshchinno-porovykh kollektorov slantsevogo tipa. Nedropol'zovaniye XXI vek = Subsoil use XXI century. 2017. No. 3 (60). P. 47–69. EDN WHBISD. (In Russ.).
25. Guan Q, Chen C, Pu X, Wan Y, Xu J, Zeng H, Jia C, Gao H, Yang W, Peng Z. Production performance analysis of a continental shale oil reservoir in Bohai Bay basin. Petroleum. Available online 29/11/2023. <https://doi.org/10.1016/j.petlm.2023.11.002>
26. Melnikov L, Martynov M, Demin V, Cherevko M, Zarai E, Ezersky D, Karpekin E, Weinheber P, Filimonov A, Novikov S, Blinov V, Mikhaltseva I. Defining Potentially-Productive Intervals and Evaluating Petrophysical Properties of the Tight-Oil Bazhenov Formation in Western Siberia Using a Suite of Modern Wireline Logs. SPE-176698-MS, SPE Russian Oil and Gas Technical Conference, October 26-28, 2015, Moscow, Russia. <https://doi.org/10.2118/176698-MS>
27. Gutman IS, Potemkin GN, Balaban IYu, Postnikov AV, Postnikova OV, Saakyan MI, Zhukov VV, Alekseev AD, Karpov IA, Spasennykh MYu, Kozlova EV. Volumetric control for hydrocarbon resources estimations based on geochemical laboratory measurements. Neftanoe hozajstvo = Oil Industry. 2016. Available from: <https://istina.msu.ru/publications/article/249468630/> ([Accessed 12 January 2025]). (In Russ.).
28. Nemova VD. Key aspects of the efficiency of sorbed hydrocarbons development technology in source rocks. Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika = Oil and gas geology. Theory and practice. 2020;15(1). https://doi.org/10.17353/2070-5379/1_2020 (In Russ.).
29. Alekseev AD, Bratkova VG, Gutman IS, Demin VYu, Karpov VB, Kuzmin YuA, Metta DA, Nemova VD, Revnivykh VA, Ulyanov VS, Fedorova DV, Chukhlantseva ER, Shubina AV, Shpilman AV. Guidelines for calculating oil reserves in sediments of the Bazhenov horizon of the West Siberian oil and gas province. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. www.gkz-rf.ru/. (In Russ.).
30. Wang S, Feng Q, Javadpour F, Xia T, Li Z. Oil adsorption in shale nanopores and its effect on recoverable oil-in-place. International Journal of Coal Geology. 2015;(147–148):9–24. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2015.06.002>

31. Downey RA. System and method for optimized production of hydrocarbons from shale oil reservoirs via cyclic injection. US11851997B2. Date of patent 26.12.2023.
32. Ivanov DA, Gudoshnikov AS, Marquez R. Development features of super-viscous, extra-heavy oil field block under natural drive (Orinoco oil belt). Neftegazovaya Geologiya. Teoriya I Praktika = Oil and gas geology. Theory and practice. 2024;19(3). Available from: https://www.ngtp.ru/rub/2024/26_2024.html [Accessed 12 January 2025] (In Russ.).

Информация об авторе

Денис Александрович Иванов – ведущий инженер отдела мониторинга добычи нефти и газа ООО «Лукойл-Инжиниринг», Researcher ID: LDG-6022-2024.

Information about the author

Denis A. Ivanov – Lead Engineer, Oil and Gas Production Monitoring, LLC LUKOIL-Engineering, Researcher ID: LDG-6022-2024.

+



НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал
Северо-Кавказского федерального
университета

ISSN 2308–4758

Выпуск № 1, 2025 г.

Т

Издательство Северо-Кавказского федерального
университета. г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1.

Корректор – М.И. Толмачев.
Компьютерная вёрстка – О.Г. Полевич.

Подписано в печать 20.02.2025 г. Выход в свет 31.03.2025 г.
Формат 70 × 108 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага
офсетная. Усл. печ. л. 18,03. Тираж 1 000 экз. Цена 534 руб.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет».
355029, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2.