

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 № 4, 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:	интеграция, развитие и продвижение современных и актуальных проблем наук о Земле посредством публичного обсуждения исследований высокого уровня в целях применения полученных научных знаний на практике для решения глобальных и локально-региональных проблем устойчивого развития.
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	2308–4758
DOI	https://doi.org/10.37493/2308-4758.0
Журнал	зарегистрирован в Роскомнадзоре (ПИ № ФС77–52723 от 8.02.2013).
Выходит	4 раза в год.
Дата выхода	первого номера: 25.02.2013.
Дата выхода	текущего номера: 30.12.2025.
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.
Авторское право	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. 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., д-р геогр. н., профессор (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); Галай Б. Ф., 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., д-р геогр. наук, профессор (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия)
Переводчик-редактор:	Марченко Т. В., кандидат филологических наук, доцент (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия).

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. 4, 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 integrate, develop and promote topical issues in the Earth sciences through public discussion of high-level research in order to apply the scientific knowledge in practice to solve global and local-regional problems of sustainable development.
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	2308–4758. https://doi.org/10.37493/2308-4758.0
The journal is	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	of the first issue: 25.02.2013.
Publication date	of the current issue: 30.12.2025
Information on renaming:	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:	1000 copies.
Subscription index	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://scien-ceit.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, 2025

“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, Dr. Sci. (Geogr.), 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); Boris F. Galay, 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:	Dr. Sci. (Geogr.), Professor Ivan A. Soloviev (North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia)
Translator-editor	Cand. Sci. (Philol.), Professor, Associate Professor Tatiana V. Marchenko (North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 4, 2025

ЮБИЛЕИ

И.А. Соловьев, В.В. Чихичин К юбилею профессора Виталия Семеновича Белозерова	11
I.A. Soloviev, V.V. Chikhichin To the anniversary of professor Vitaly Semenovich Belozеров	11

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

1.6.13. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ (географические науки)	
В.С. Белозеров, Д.Г. Акинин, Ю.Ф. Зольникова Динамика миграционных процес- сов в городах России в постсоветский период	21
Vitaly S. Belozеров, Danil G. Akinin, Julia F. Zolnikova Dynamics of migration processes in Russian cities in the post-soviet period	22

- 1.6.18. НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ
(физико-математические науки)
- Б.А. Ашабоков, А.А. Ташилова,
Л.А. Кешева, Н.В. Теунова**
Влияние климатических факто-
ров на условия производства сельскохозяйст-
венной продукции в КБР 47
- В.А. Ashabokov, А.А. Tashilova,
L.A. Kesheva, N.V. Teunova**
The influence of climatic factors
on the conditions of agricultural production in the
Kabardino-Balkarian Republic 48
- Л.Т. Созаева,
А.Х. Кагермазов**
Оценка максимального размера
града по термодинамическим параметрам ат-
мосферы методами нейросетевого моделиро-
вания 69
- L.T. Sozaeva,
A.Kh. Kagermazov**
Estimation of the maximum hail
size based on thermodynamic atmosphere param-
eters using neural network modeling methods 70
- 1.6.21. ГЕОЭКОЛОГИЯ
(географические науки)
- Н.Е. Рязанова, А. Д. Куракова,
А.А. Гайсина**
Анализ динамики снежного пок-
рова ледника Большой Азау (Кабардино-Бал-
кария) по данным дистанционного зондирова-
ния и метеонаблюдений (2018–2024 гг.) 85

N.E. Ryazanova, A.D. Kurakova, A.A. Gaisina Analysis of snow cover dynamics of the Bolshoy Azau glacier (Kabardino-Balkaria) using remote sensing and meteorological data (2018–2024)	86
--	----

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

2.8.4. РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (технические науки)	
А.Д. Белугин, Р.А. Зайцев, М. А. Агупов Обоснование выбора систе- мы разработки массивной нефтяной оторочки крупного шельфового месторождения Север- ного Каспия	105
A.D. Belugin, R.A. Zaitsev, M.A. Agupov Feasibility study for the choice of the development system for a massive oil rim of a large offshore field in the North of the Caspian sea	106
В.В. Вержбицкая Сравнение результативности уз- лового и факторного анализа при интегриро- ванном проектировании разработки месторож- дений нефти и газа	129
V.V. Verzhbitskaya Comparison of the performance of nodal and factor analysis in integrated design of oil and gas field development	130

- Р.А. Гасумов, Э.Р. Гасумов,
Ю.К. Димитриади, А.-Г.Г. Керимов,
Н.Г. Федорова**
Исследование механизмов и причин разрушения пластов-коллекторов при разработке газовых месторождений 151
- R.A. Gasumov, E.R. Gasumov,
Yu.K. Dimitriadi, A.-G. G. Kerimov,
N.G. Fedorova**
The study of mechanisms and causes of reservoir destruction in gas field development 152
- В.Г. Копченков, В.В. Федоренко,
Р.Е. Шестерикова, В.С. Крамаренко,
Е.Г. Керимова**
Промыслово-геологический анализ минеральной неоднородности горной породы на микроуровне косвенными и прямыми исследованиями 175
- V.G. Kopchenkov, V.V. Fedorenko,
R.E. Shesterikova, V.S. Kramarenko,
E.G. Kerimova**
Industrial geological analysis of mineral heterogeneity of rocks at the micro-level using indirect and direct research 176



Юбилей
Anniversaries

К ЮБИЛЕЮ ПРОФЕССОРА ВИТАЛИЯ СЕМЕНОВИЧА БЕЛОЗЕРОВА

Иван Алексеевич Соловьев¹,
Василий Васильевич Чихичин²

^{1,2} Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина,
Ставрополь, 355017, Российская Федерация)

¹ soloivan@mail.ru

² wawachi@yandex.ru

To the anniversary of professor Vitaly Semenovich Belozеров

Ivan A. Soloviev¹,
Vasiliy V. Chikhichin²

^{1,2} North-Caucasus Federal University (1, Pushkin St., Stavropol,
355017, Russian Federation)

¹ soloivan@mail.ru

² wawachi@yandex.ru

Виталий Семенович Белозеров 12 ноября 2025 года отметил свой 75-летний юбилей. Результаты его научно-исследовательской деятельности впечатляют: три с половиной сотни научных работ, первый доктор географических наук в Ставропольском крае, соруководитель научной школы со статусом «ведущая», руководитель двух десятков грантов, организатор стольких же представительных научных конференций, главный редактор научного журнала «Наука. Инновации. Технологии», член Научного совета РАН «Демографическое развитие и демографическая политика Российской Федерации».

Богатый педагогический опыт Виталия Семенович вызывает глубокое уважение и благодарности от его многочисленных учени-



Профессор
Виталий Семенович
БЕЛОЗЕРОВ

ков. При этом он сам – верный и творческий ученик ставропольской географической школы, преумноживший её достижения. Юбиляр предан своей Альма-матер, несколько раз менявшей название – Ставропольский государственный педагогический институт, Ставропольский государственный педагогический университет, Северо-Кавказский федеральный университет. Студентом он пришёл сюда в 1968 г., аспирантом и ассистентом вернулся в 1977 г. Кафедрой социально-экономической географии заведовал 38 лет, проректором по учебной работе был 22 года, руководил факультетом (институтом) в разное время 10 лет.

Заслуги Виталия Семеновича отмечены почетными наградами и званиями. Он почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, почетный работник науки и техники Российской Федерации, почетный член Русского географического общества, заслуженный профессор Северо-Кавказского федерального университета, обладатель премии им. В.П. Семенова-Тянь-Шанского от Ассоциации российских географов-обществоведов.

Всех достижений, заслуг и наград В.С. Белозерова не перечислить, обязательно что-нибудь забудется. Да

и нет в этом смысла. Главные результаты к его 75-летию – заслуженный авторитет в профессиональном сообществе, признательность учеников и искренняя любовь ближайших коллег и товарищей. Впереди – долгие годы плодотворной работы и новые вершины.

Коротко расскажем о жизненном и профессиональном пути Виталия Семеновича Белозерова, упомянув основные факты, вехи, события и достижения.

Итак, будущий ставропольский географ родился в Ростовской области в селе Средний Егорлык в семье Семена Федоровича и Екатерины Павловны Белозёровых, которые воспитали дочь и пятерых сыновей [1]. Виталий Семенович считает, что его род берет своё начало от древнего русского города Белозёрск (первое упоминание в 862 г. [2]).

Село Средний Егорлык (Лежанка) основано в 1803 году на Большом Черкасском тракте, соединяющим столицу области Войска Донского с уездным городом Кавказской губернии – Ставрополем. Изначально оно входило в состав Ставропольского уезда, который в то время заселялся преимущественно однодворцами¹ из Курской губернии [3, с. 390, 439]. Среди первопоселенцев Лежанки были Белозеровы, о чем свидетельствует упоминание Осипа Белозерова в приговоре общества села от 21 сентября 1847 г. [4].

В советские годы село Средний Егорлык стало частью Ростовской области, административный центр которой был ближе до него, чем столица Ставропольского края. Несмотря на это, Виталий Семенович для получения высшего образования в 1968 г. выбрал естественно-географический факультет Ставропольского государственного педагогического института (вслед за сестрой Валентиной, которая в это время уже училась на историко-филологическом факультете СГПИ). С этого года судьба юбиляра навсегда перепле-

1 Однодворцы – сословная группа в Российской империи, юридически существовавшая в начале XVIII – середине XIX вв. Являлись главным образом потомками служилых людей XVII века (детей боярских, стрельцов, казаков, дворян и других). Однодворцы были лично свободными (не были закрепощены), имели во владении землю, на которой жили, а также имели право на владение крепостными крестьянами в своих усадьбах [5].

лась с альма-матер и со Ставрополем. После окончания института в 1973–1977 гг. Виталий Семенович испытал себя в роли учителя географии и биологии, организатора внеклассной работы в сельских школах Ставропольского края [1].

Возвращение в родной институт состоялось в 1977 г. В 1978 г. Виталий Семенович под руководством известного ставропольского ученого-географа Виктора Александровича Шальнева занялся исследованиями в рамках рекреационной географии [1]. Увлечение наукой привело В.С. Белозерова вначале на стажировку, а впоследствии в аспирантуру Института географии АН СССР. Его научными руководителями стали выдающиеся советские географы – Георгий Михайлович Лаппо и Владимир Сергеевич Преображенский.

В 1984 г. Виталий Семенович успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Динамика системы городских поселений курортного района Кавказские Минеральные Воды» в диссертационном совете Института географ АН СССР. В 1989 г. он получил ученое звание доцента по кафедре экономической географии. Спустя 16 лет (в 2000 г.) Виталий Семенович в том же диссертационном совете защитил докторскую диссертацию на тему «География и динамика этнической структуры населения Северного Кавказа», а в 2002 г. ему было присвоено ученое звание профессора по кафедре экономической и социальной географии [6].

В 1986 г. В.С. Белозеров возглавил кафедру экономической географии, а через год и естественно-географический факультет СГПИ. В 1990 г. Виталий Семенович становится проректором по учебной работе. Работал он на этой должности до 2012 г., то есть до создания Северо-Кавказского федерального университета. В новом университете Виталий Семенович в разное время занимал должности советника ректората, проректора по научной работе, директора института математики и естественных наук, директора института наук о Земле.

Кафедрой Виталий Семенович руководил 38 лет. За это время много раз менялось её название, самым широким оно было с формулировкой «кафедра социально-экономической географии, геоинформатики и туризма». Но главным принципом работы кафедры всегда оставалось служение науке и образованию, симбиоз этих главных сущностей университетского образования.

На кафедре социально-экономической географии в последние годы работали 4 доктора наук, 8 кандидатов наук, успешно обеспечивалась подготовка научно-педагогических кадров в аспирантуре и докторантуре. В качестве приглашенных преподавателей на кафедру привлекались ведущие ученые зарубежных и российских университетов и академических структур, руководители и ведущие специалисты организаций туристической сферы, образования, стратегического и территориального планирования. В разные годы к преподавательской деятельности и научному руководству привлекались С. В. Рязанцев – д-р экон. наук, член корреспондент РАН, П. М. Полян – д-р геогр. наук, профессор. Активно развивалась академическая мобильность преподавателей, аспирантов и студентов.

Кафедра социально-экономической географии – неотъемлемое и важное звено географического образования в Северо-Кавказском федеральном университете. Географические кафедры вуза всегда обеспечивали высокий уровень подготовки специалистов. Предметная область «География» СКФУ входит в топ-20 предметного рейтинга Эксперта РА 2025 года.

В.С. Белозеров создал в университете научную школу «Трансформация воспроизводства, расселения и образа жизни населения» (соруководитель доктор географических наук, профессор Наталия Александровна Щитова). Под руководством профессора Белозерова защищена одна докторская диссертация и 16 – кандидатских (табл.). Среди его учеников: доктор экономических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией Института демографических исследований Федерального научно-исследовательского центра РАН Сергей Васильевич Рязанцев; кандидат географических наук, директор Центра геодемографии и пространственного развития МГУ им. М. В. Ломоносова, Председатель Ассоциации развития территорий Александр Николаевич Панин.

Ценно, что исследовательские задачи научной школы совместно с учёными всегда решают студенты и аспиранты. Заслуги коллектива в 2016 г. отмечены свидетельством «Ведущая научная школа» (№ НШ-9300.2016.6) по результатам конкурса на право получения грантов Президента Российской Федерации. Среди других актов общественного признания – национальная премия РГО «Хрустальный компас» в области природного и культурного наследия,

Таблица. СПИСОК ДОКТОРАНТОВ И АСПИРАНТОВ,
ЗАЩИТИВШИХ ДИССЕРТАЦИИ ПОД РУКОВОДСТВОМ
ПРОФЕССОРА В. С. БЕЛОЗЕРОВА

ФИО соискателя	Год защиты диссертации	Присужденная ученая степень
Рязанцев С.В.	1998	кандидат экономических наук
Эшроков В.М.	2000	кандидат географических наук
Коваленко О.Ю.	2002	кандидат географических наук
Овсянников Е.И.	2002	кандидат педагогических наук
Зольникова Ю.Ф.	2003	кандидат географических наук
Соловьев И.А.	2004	кандидат географических наук
Авдеев Е.Н.	2005	кандидат географических наук
Панин А.Н.	2005	кандидат географических наук
Шиббаева М. А.	2005	кандидат социологических наук
Галачиева Л.А.	2006	кандидат географических наук
Маслиев Р.О.	2006	кандидат географических наук
Зеленская А.Е.	2010	кандидат географических наук
Раужин И.Г.	2012	кандидат географических наук
Черкасов А.А.	2013	кандидат географических наук
Супрунчук И.П.	2015	кандидат географических наук
Сопнев Н.В.	2023	кандидат географических наук
Соловьев И.А.	2025	доктор географических наук

экологии за «Этнический атлас Ставропольского края» (2014 г., руководитель В. С. Белозеров, авторы – А. Н. Панин, В. В. Чихичин, Р. А. Приходько, А. А. Черкасов, Р. К. Махмудов, И. П. Супрунчук, С. Ю. Антипов, А. Н. Барсуков, Ю. В. Клементьев, А. Ю. Кудинов, Л. И. Корнева).

За почти полвека научной деятельности юбиляр опубликовал около 350 научных работ разнообразной тематики и формы, в том числе и за рубежом, среди них:



Авторский коллектив «Этнического атласа Ставропольского края» с «Хрустальным компасом».

- монографии: «Эволюция расселения Ставрополя и Карачаево-Черкесии» (1993, соавторы Л. П. Белозерова, П. П. Турун), «Кавказские Минеральные Воды: эволюция системы городов эколого-курортного региона» (1997), «Этнодемографические процессы на Северном Кавказе» (2000), «Этническая карта Северного Кавказа» (2005);
- атласы: «Этнический атлас Ставропольского края» (2008, 2014, коллектив авторов), «Миграционные процессы в России» (2011, коллектив авторов), «Миграционный атлас Российской Федерации» (2022, коллектив авторов),

- учебники и путеводители: «Экономическая и социальная география Ставропольского края» (1996, соавтор К. А. Магомедов), «География Апанасенковского района» (2008, соавторы П. П. Турун, А. Н. Панин, В. В. Чихичин), «Ставропольский край (путеводитель)» (2005, соавторы А. Н. Панин, В. В. Чихичин).

Виталий Семенович участвовал в разработке ряда тематических карт Атласа социально-политических проблем, угроз и рисков Юга России (2007, науч. рук. акад. Г. Г. Матишов) и др.

Среди соавторов В. С. Белозерова – известные отечественные и зарубежные ученые, а именно Полян П. М. (д-р геогр. наук), Преображенский В. С. (д-р геогр. наук), Зайончковская Ж. А. (канд. геогр. наук), Лаппо Г. М. (д-р геогр. наук), Колосов В. А. (д-р геогр. наук), Матишов Г. Г. (д-р геогр. наук, академик РАН), Вендина О. И. (канд. геогр. наук), Тикунов В. С. (д-р геогр. наук), Трейвиш А. И. (д-р геогр. наук), Зорин И. В. (д-р пед. наук), Молодикова И. Н. (канд. геогр. наук), Радвани Ж. (профессор Национального института восточных языков и культур, г. Париж), Рязанцев С. В. (д-р экон. наук, член корр. РАН), Щитова Н. А. (д-р геогр. наук), Соловьев И. А. (д-р геогр. наук), Сумской Д. А. (д-р юрид. наук), Фрайер П. (профессор университета Восточной Финляндии), Шальнев В. А. (д-р геогр. наук), Шаповалов В. А. (д-р социол. наук), Штадельбауэр Й. (профессор Фрайбургского университета, ФРГ) и др.

Под руководством Виталия Семеновича выполнено более 20 грантовых проектов, поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ), Российским гуманитарным научным фондом (РГНФ), фондом Президента РФ, Российским научным фондом (РНФ). Он участвовал в реализации ряда проектов зарубежных фондов.

Юбиляр – вдохновитель и организатор более 20 международных и всероссийских конференций по проблемам демографического развития, адаптации и интеграции мигрантов, развитию туризма, геоинформационным технологиям и географическому образованию. В их работе принимали участие известные ученые ведущих

научных центров России (МГУ им. М.В. Ломоносова, Институт географии РАН, Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Институт демографических исследований РАН, СПбГУ, ЮФУ, РГСУ, СОГУ и др.), а также ученые других стран: Аргентины, Бразилии, Беларуси, Франции, Германии, США, Хорватии, Великобритании, Румынии, Болгарии, Венгрии, Финляндии, Японии, Китая, Таджикистана, Узбекистана, Грузии, Израиля, Азербайджана, Армении, Турции, Австралии, Казахстана.

Более десяти лет Виталий Семенович был председателем общественно-консультативного совета по миграции при УФМС России по Ставропольскому краю. Он является членом краевой комиссии всероссийской переписи населения с 1989 года, награждён медалями «За заслуги в проведении Всероссийской переписи населения» (2002 и 2010 годы).

Виталий Семенович Белозеров и сегодня служит родному университету, активно работает на благо Отечества, вкладывая богатый опыт и уникальные знания в будущих географов, продолжая исследовать территориальные особенности населения нашей страны. Он внёс неоценимый вклад в развитие ставропольской географии, в достижение ею позиции одной из ведущих в России.

Виталий Семенович – достойный ученик географической школы института географии РАН и Учитель ставропольской географической школы! С юбилеем, долгих лет жизни, крепкого здоровья, удачи, новых научных свершений!

Список источников

1. Белозеров Виталий Семенович: библиографический указатель / сост.: В. В. Чихичин, А. Н. Панин. Ставрополь: Изд-во СГУ, 2010. 60 с.
2. Белозерск [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Белозерск> (дата обращения: 13.10.2025).
3. Соловьев И.А. Пространственно-временная трансформация процессов адаптации мигрантов на Северном Кавказе: дис ... д-ра геогр. наук / Северо-Кавказский федеральный университет. Ставрополь, 2025. 480 с.
4. Государственный архив Ставропольского края (ГАСК). Фонд 132. Опись 1. Дело 239. Лист 208.
5. Одноворцы [Электронный ресурс]. URL: <https://>

ru.wikipedia.org/wiki/Одnodворцы (дата обращения: 13.10.2025).

6. Полян П. М. Удвоение личности // Демоскоп. 2015. № 663–664.

References

1. Vitaly Semenovich Belozеров: Bibliographic Index / compiled by VV Chikhichin, AN Panin. Stavropol: SSU Publishing House, 2010. 60 p. (In Russ.).
2. Belozersk [Electronic resource]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Белозерск> [Accessed 13 October 2025]. (In Russ.).
3. Soloviev IA. Spatio-temporal transformation of migrant adaptation processes in the North Caucasus. Dissertation for the degree of Doctor of Geographical Sciences / North-Caucasus Federal University. Stavropol, 2025. 480 p. (In Russ.).
4. State Archives of Stavropol Krai (GASK). Collection 132. Inventory 1. File 239. Sheet 208. (In Russ.).
5. Odnodvortsy [Electronic resource]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Одnodворцы> [Accessed 13 October 2025]. (In Russ.).
6. Polyani PM. Doubling of personality. Demoscope. 2015. No. 663-664. (In Russ.).

Информация об авторах

Иван Алексеевич Соловьев – доктор географических наук, доцент, профессор департамента географии и геоинформатики факультета международных отношений Северо-Кавказского федерального университета

Василий Васильевич Чихичин – кандидат географических наук, доцент, доцент департамента географии и геоинформатики факультета международных отношений Северо-Кавказского федерального университета

Information about the authors

Ivan A. Soloviev – Dr. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Professor of the Department of Geography and Geoinformatics, Faculty of International Relations, North-Caucasus Federal University.

Vasily V. Chikhichin – Can. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geography and Geoinformatics, Faculty of International Relations, North-Caucasus Federal University.



Научная статья

УДК 314.7

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.1>

ДИНАМИКА МИГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГОРОДАХ РОССИИ В ПОСТСОВЕТСКИЙ ПЕРИОД

Виталий Семенович Белозеров¹,
Данил Геннадьевич Акинин²,
Юлия Федоровна Зольникова^{3*}

^{1,2,3} Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)

¹ vsbelozerov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2627-657X>.

² stavguide.info@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-7025-230>

³ zolnst@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2150-7284>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Статья посвящена проблеме миграции населения в целом в городах России и региональных столицах в постсоветский период. Исследование основано на данных официальной статистики за 1994–2023 гг. В условиях глубокого демографического кризиса миграция выполняет важную роль в формировании населения России. В начале постсоветского периода под влиянием новых для России факторов (распада СССР, социально-экономического кризиса, обострение межэтнических отношений и др.), изменились масштабы миграционных потоков и их география – регионы, принимающие и отдающие, мигрантов поменялись ролями. Восточный миграционный тренд сменился на западный. В исследовании выявлены особенности миграционных процессов на каждом из этапов постсоветского периода. В начале постсоветского периода зона с положительным сальдо миграции в городах включала большую часть Европейской России, за исключением северных регионов, а также Западную Сибирь, регионы Восточной Сибири. Постепенно зона с положительным сальдо миграции в городах сокращается, в настоящее время отмечается положительный миграционный прирост в городах Дальнего Востока. По характеру миграционных процессов регионы и региональные столицы дифференцированы: примерно 10% из них имеют устойчивый высокий миграционный прирост, столько же – отрицательный, у остальных показатели сальдо миграции меняются от периода к периоду, в зависимости от миграционной ситуации в стране. Моделирование миграционных

процессов с помощью центрографического метода показало, что центр расселения мигрантов по выбытию за период исследования сместился с юга Якутии на границу Урала и Поволжья, а по прибытию – перемещается вокруг столичного региона.

Ключевые слова: миграция населения, сальдо миграции, региональные столицы, городское население, региональные особенности

Для цитирования: Белозеров В.С., Акинин Д.Г., Зольникова Ю.Ф. Динамика миграционных процессов в городах России в постсоветский период // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 4 С. 21–46. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.1>

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00057, <https://rscf.ru/project/25-27-00057/>

Конфликт интересов: доктор географических наук, профессор Белозеров Виталий Семенович является главным редактором и членом редакционной коллегии журнала «Наука. Инновации. Технологии». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанным с этой рукописью.

Статья поступила в редакцию 15.06.2025;
одобрена после рецензирования 25.09.2025;
принята к публикации 06.11.2025.

1.6.13. Economic, Social, Political and Recreational Geography (Geographical Sciences) Research article

Dynamics of migration processes in Russian cities in the post-soviet period

Vitaly S. Belozеров¹,
Danil G. Akinin²,
Julia F. Zolnikova^{3*}

^{1, 2, 3} North-Caucasus Federal University (1, Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation)

¹ vsbelozerov@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2627-657X>.

² stavguide.info@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-7025-230>

³ zolnst@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2150-7284>

* Corresponding author

Abstract.

The article is devoted to the problem of population migration in Russian cities and regional capitals in the post-Soviet period. The study is based on official statistics data for 1994–2023. In the context of a deep demographic crisis, migration plays an im-

portant role in shaping the population of Russia. At the beginning of the post-Soviet period, under the influence of new factors for Russia (the collapse of the USSR, the socio-economic crisis, the aggravation of interethnic relations, etc.), the scale and geography of migration flows changed, and the regions that received and sent migrants switched roles. The eastern migration trend has been replaced by the western one. The study identifies the features of migration processes at each stage of the post-Soviet period. At the beginning of the post-Soviet period, the zone with a positive migration balance in cities included most of European Russia, with the exception of the northern regions, as well as Western Siberia and the regions of Eastern Siberia. Gradually, the zone with a positive migration balance in cities has been shrinking, and now there is a positive migration growth in the cities of the Far East. The regions and regional capitals differ in terms of the nature of migration processes: approximately 10% of them have a steady high migration growth, while the same number have a negative migration balance, and the remaining regions have varying migration balances depending on the migration situation in the country. Modeling migration processes using the centographic method showed that the center of migration settlement shifted from the south of Yakutia to the border between the Urals and the Volga region during the study period, while the center of migration arrival moved around the capital region.

- Keywords:** population migration, migration balance, regional capitals, urban population, regional peculiarities.
- For citation:** Belozеров VS, Akinin DG, Zolnikova JuF. Dynamics of migration processes in Russian cities in the post-Soviet period. *Science. Innovations. Technologies.* 2025;(4):21-46. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.1>
- Funding:** the study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation within the framework of scientific project No. 25-27-00057, <https://rscf.ru/project/25-27-00057/>
- Conflict of interest:** Doctor of Geographical Sciences, Professor Vitaly Semenovich Belozеров is the editor-in-chief and a member of the editorial board of the journal 'Science. Innovations. Technologies.' The authors are not aware of any other potential conflicts of interest related to this manuscript.

The article was submitted 15.06.2025;
approved after reviewing 25.09.2025;
accepted for publication 06.11.2025.

Введение

Постсоветский период на территории России наряду с геополитическими и социально-экономическими преобразованиями внес и новые тенденции в развитие процессов народонаселения страны. Новые тренды в значительной степени отразились и на миграции населения: масштабах, географии, причинах, региональных особенностях. Изменения в миграционных процессах России наблюдаются на разных территориальных уровнях: от общенационального до отдельных населенных пунктов, в т. ч. особое место в миграциях населения приобретают города. В условиях депопуляции миграция является основным фактором увеличения численности населения в некоторых административных центрах и крупных городах России, при этом малые города теряют население за счет миграций.

Исследованиями различных аспектов миграции населения в городах занимаются представители многих научных направлений: географы, экономисты, социологи, политологи и др.

Проблемы миграционных процессов в городах отдельных регионов России исследовались А.Г. Махровой и др., Е.Е. Тиниковой, Н.В. Гонтарь, С.Х. Мухаметдиновой и Е.Ю. Тюменцевой, Г.Ф. Ахметовой [1; 2; 3; 4; 5]. Выявлялись факторы миграции населения, изучались тенденции миграции и направления миграционных потоков.

Анализ миграционных процессов в городах различной плотности встречается ряде исследований. Н.В. Мкртчян и Ю.Ф. Флоринская изучали внутреннюю трудовую миграцию населения на примере жителей малых и средних городов России, выявили экономический эффект трудовой миграции для этих городов и сделали вывод, что жители малых городов чаще, чем средних, участвуют в трудовой миграции [6]. Е.О. Бедретдинова отмечает, что в России негативной тенденцией последних лет можно считать деградацию и «демографическое сжатие» населения в малых городах и сельской местности, малые города теряют население, в основном молодежь, слабы экономически, не имеют предпосылок развития [7]. А.В. Рогова и Н.В. Левченко выявили причины миграции молодежи из малых городов на основе экспертного интервью и опроса фокус-групп

в 21 российском малом городе [8]. А.В. Аксянова и С.В. Чехломин отмечают повышенный отток населения из моногородов РФ и анализируют факторы, которые могут повлиять на повышение привлекательности моногородов для населения [9].

Несколько работ Н.В. Мкртчяна отражают особенности миграционных процессов в региональных столицах в различных аспектах. Им исследуется внутрироссийская миграция в региональные столицы и нестоличные территории, миграция молодежи в региональные центры, миграция и субурбанизация в региональных столицах и их пригородах и др. [10; 11; 12]. В статье Л.Б. Карачуриной и др. отмечается, что у большинства региональных столиц наблюдается миграционный прирост. Чем крупнее столица и выше ее миграционная привлекательность, тем протяженнее зона возможного нетто-прироста в ее пригородах. Ближние пригороды представляют собой продолжение региональных столиц за их административными границами, обеспечивая возможности их экстенсивного роста [13].

Миграционные процессы в региональных столицах Юга Европейской России исследовались Н.В. Сопневым и В.С. Белозеровым, были выявлены сходные черты миграций в региональных столицах и регионах [14], при изучении региональных столиц Дальнего Востока А.В. Винокуровой и А.И. Яковлевым отмечен «переток» населения из сельских территорий в региональные столицы [15].

Звоновский В.Б. и др. исследуют формирование городских сообществ в новых пригородах крупных российских городов (Самара, Ростов-на-Дону, Кемерово) и отмечают, что новые пригороды рядом с крупными российскими городами, привлекают работающее население среднего и младшего возраста из «материнских» городов. Новые городские пространства более жизнеспособны и перспективны [16]. В статье К.В. Григоричева рассматривается, как развитие пригородов Иркутска изменяет миграционные процессы на субрегиональном уровне, а последние становятся важнейшим механизмом и одновременно – индикатором субурбанизации. Число жителей пригородной зоны региональных центров растет опережающими темпами во всех регионах Сибири на фоне снижения численности населения в регионах в целом [17].

В зарубежных исследованиях также исследуются миграционные процессы в разных по численности городах. К.Б. Ньюболд на примере Канады, Де Йонг и др. на примере Нидерландов исследовали иерархию городов по их привлекательности для мигрантов разных возрастных групп и переток населения по иерархическим уровням городов [18; 19]. Исследования внутренней миграции в Китае и Японии выявляют перемещения населения с более низких уровней городской иерархии на более высокие [20; 21].

Целью исследования является выявление на основе данных официальной статистики динамики миграционных процессов в городах России в целом и в региональных столицах в постсоветский период.

Материалы и методы исследований

Информационной основой исследования являются данные Росстата за 1994, 2004, 2014 и 2023 гг., которые получены из статистического сборника «Численность и миграция населения Российской Федерации» [22], а также ЕМИСС [23; 24]. Для выявления характера динамики миграционных процессов в работе анализируются статистические данные с десятилетним интервалом, за исключением периода с 2014 по 2023 год. Это разные по масштабам миграционного прироста годы демонстрируют неустойчивый характер миграционных процессов в городах России.

На основе официальной демографической статистики была создана база геоданных регионального уровня (субъекты РФ), обеспечившая проведение исследований на полимасштабном уровне: городская местность страны, городская местность регионов, города-региональные столицы¹.

Статистической основой базы геоданных являются следующие расчетные показатели:

- Численность городского населения субъектов РФ в 1994, 2004, 2014, 2023 гг. на начало года (тыс. чел.);
- Миграционный прирост/убыль городского населения субъектов РФ в 1994, 2004, 2014, 2023 гг. (чел.);

¹ Отсутствуют данные по ЛНР, ДНР, Запорожской и Херсонской области.

- Коэффициенты миграционного прироста/убыли городского населения субъектов РФ в 1994, 2004, 2014, 2023 гг. (‰);
- Миграционный прирост/убыль населения городов-региональных центров России 2000, 2014, 2023 гг. (чел.);
- Коэффициенты миграционного прироста/убыли населения региональных столиц РФ в 2000, 2014, 2023 гг. (‰).

Созданная информационная база позволила провести анализ миграционной ситуации в городской местности и региональных столицах России в постсоветский период.

Для визуализации собранных данных был разработан ряд тематических карт Российской Федерации с обозначением границ субъектов, соседних государств и омывающих страну морей, в масштабе 1:30 000 000. В качестве картографической проекции использована равновеликая коническая проекция Альберса, обеспечивающая минимальные искажения площади территории России.

Картографическая основа была подготовлена в QGis 3.40. Векторные границы субъектов Российской Федерации были приведены к единой системе координат и адаптированы к выбранной проекции.

Картографическая основа использовалась для создания карт: Миграционный прирост в городской местности России, 1994; Миграционный прирост в городской местности и региональных столицах России, 2004; Миграционный прирост в городской местности и региональных столицах России, 2014; Миграционный прирост в городской местности и региональных столицах России, 2023. Для визуализации использовалась система ступенчатых интервалов значений коэффициента миграционного прироста, что позволило отразить пространственное распределение регионов по уровню миграционной активности.

Столицы регионов обозначены пунсонами различного диаметра, соответствующими численности их населения, что обеспечивает дополнительную наглядность, при анализе пространственных значений.

Результаты исследований и их обсуждение

Постсоветский период характеризуется значительными изменениями миграционной ситуации в стране, обусловленных геополитическими, социально-экономическими процессами, обострением межэтнических отношений и другими фундаментальными факторами. Основными чертами миграционных процессов в начале постсоветского периода являлось доминирование стрессовой миграции, рост масштабов миграционного потока, изменение миграционных процессов в системе *город – село* и концентрация миграционного прироста в городах. В новых социально-экономических условиях изменилась и география миграционных потоков – произошла смена миграционного тренда с восточного, который складывался с пореформенного периода, на западный, получивший развитие в начале постсоветского времени. В этот период территория страны четко разделилась на две зоны – принимающую и отдающую. Традиционные регионы оттока населения (Волго-Вятский, Центрально-Черноземный, Уральский) непрерывно отдававшие население, стали получать население за счет миграции. Восточная Сибирь, Дальний Восток, северные регионы напротив стали зоной оттока. На долю городской местности приходилось почти 3/5 миграционного прироста страны [25].

Миграционный прирост в городах отмечался на Северо-Западе, в Центральной России, Поволжье, на Урале и Северном Кавказе, Западной Сибири. Это была сплошная зона с положительным сальдо миграции, при этом в 85% регионов отмечался высокий и средний уровень миграционного прироста. Теряли население в ходе миграции города Севера Европейской части, Дальнего Востока и отдельные регионы Восточной Сибири (рис. 1).

В начале XXI века в условиях значительного сокращения миграционного прироста в стране усиливается территориальная дифференциация характера миграционных процессов – отмечается устойчивая тенденция концентрации мигрантов в Центральном федеральном округе (1991 г. – 36%, 1996–2000 гг. – половина, 2001–2005 гг. – 83%) и сокращения в других округах. Существенно сократилась зона с положительным сальдо миграции в Центральной России, Западной Сибири, на юге России. Весь миграционный прирост приходился на городскую местность. Положительное сальдо мигра-

ции отмечалось у третьей части регионов, таким образом, в городской местности доминировали территории с отрицательным сальдо миграции. Высокий миграционный прирост отмечался в Москве, Санкт Петербурге, Московской, Ленинградской области, Краснодарском крае. Сибирь, Дальний Восток, Север Европейской части России по-прежнему теряли население [26].

Анализ миграционных процессов на уровне городов-региональных² столиц показал, что среди этой категории городов преобладали центры с отрицательным сальдо миграции даже в регионах с положительным миграционным приростом в городской местности (Центральная Россия, Поволжье, юг Западной Сибири). При этом средний уровень отрицательного сальдо миграции отмечается в каждом десятом столичном центре (Махачкала, Грозный, Элиста, Оренбург, Курган, Мурманск, Благовещенск, Ижевск). Самой многочисленной группой были города с низким коэффициентом миграционной убыли – 42% от общего числа региональных столиц. Это разные по численности населения и представляющие практически все регионы страны – Сибирь и Дальний Восток (Новосибирск, Омск, Томск, Владивосток, Кемерово, Иркутск, Барнаул, Владивосток), Урал и Поволжье (Пермь, Уфа, Ульяновск, Йошкар-Ола). В эту группу входят столицы регионов Центральной России (Иваново, Тула, Курск, Орел, Владимир и др.), на востоке страны – Иркутск, Улан-Удэ, Благовещенск. В большинстве городов отмечается средний и низкий уровень миграционного оттока. Примечательно, что в большинстве столиц регионов зоны оттока населения сохранялся положительный миграционный прирост (Архангельск, Сыктывкар, Ханты-Мансийск, Якутск, Хабаровск) (рис. 2).

В начале второго десятилетия XXI в. масштабы «западного дрейфа» постепенно сокращаются, и снижается миграционная убыль в городах восточных регионов, происходит распад практически единой и компактной зоны с положительным сальдо миграции. Продолжается концентрация миграционного прироста в ЦФО (2006 г. – 94,6%). Наибольший отток населения идет не из Сибири

² Включая Москву и Санкт-Петербург, в 2023 г. Гатчину.

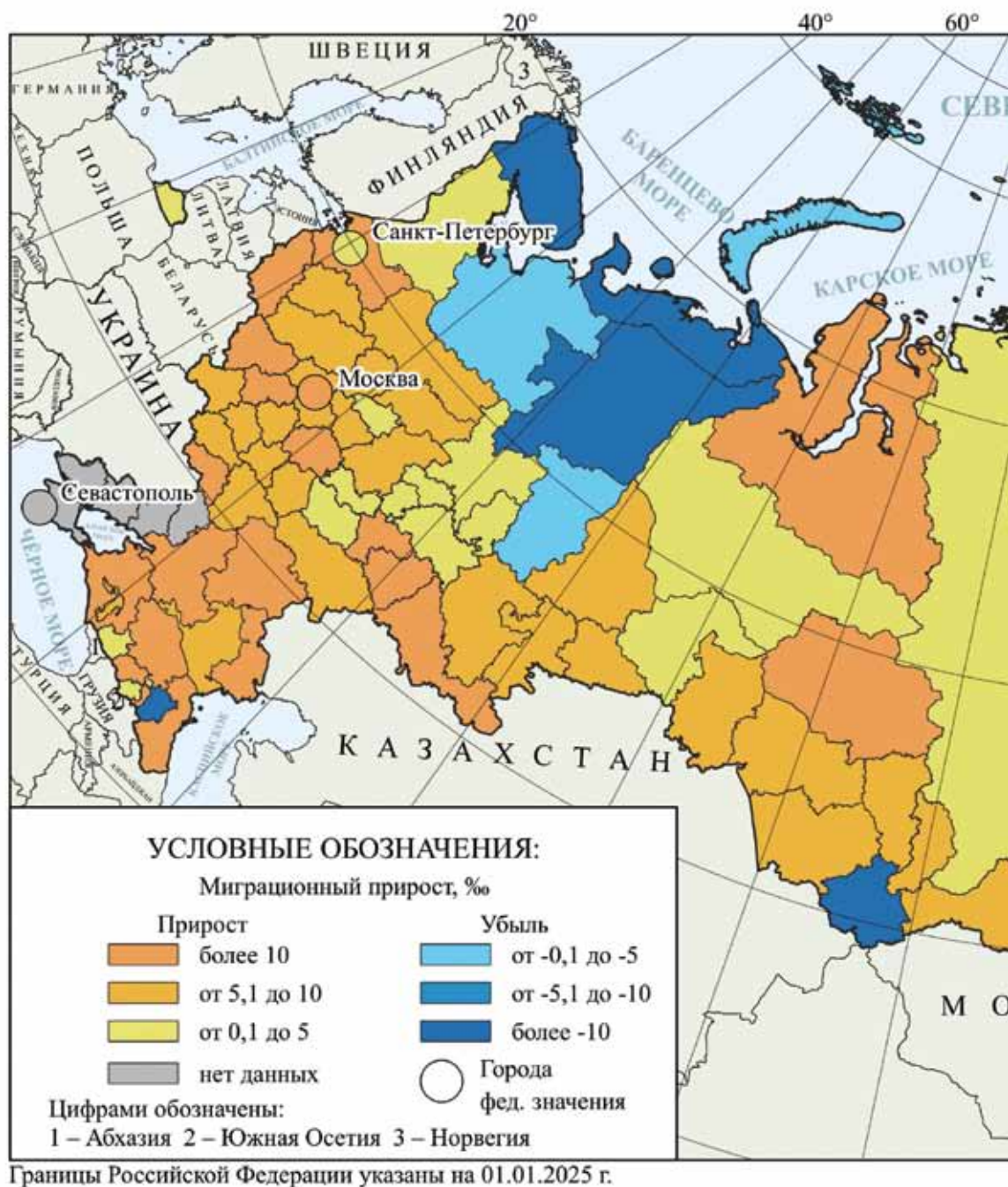
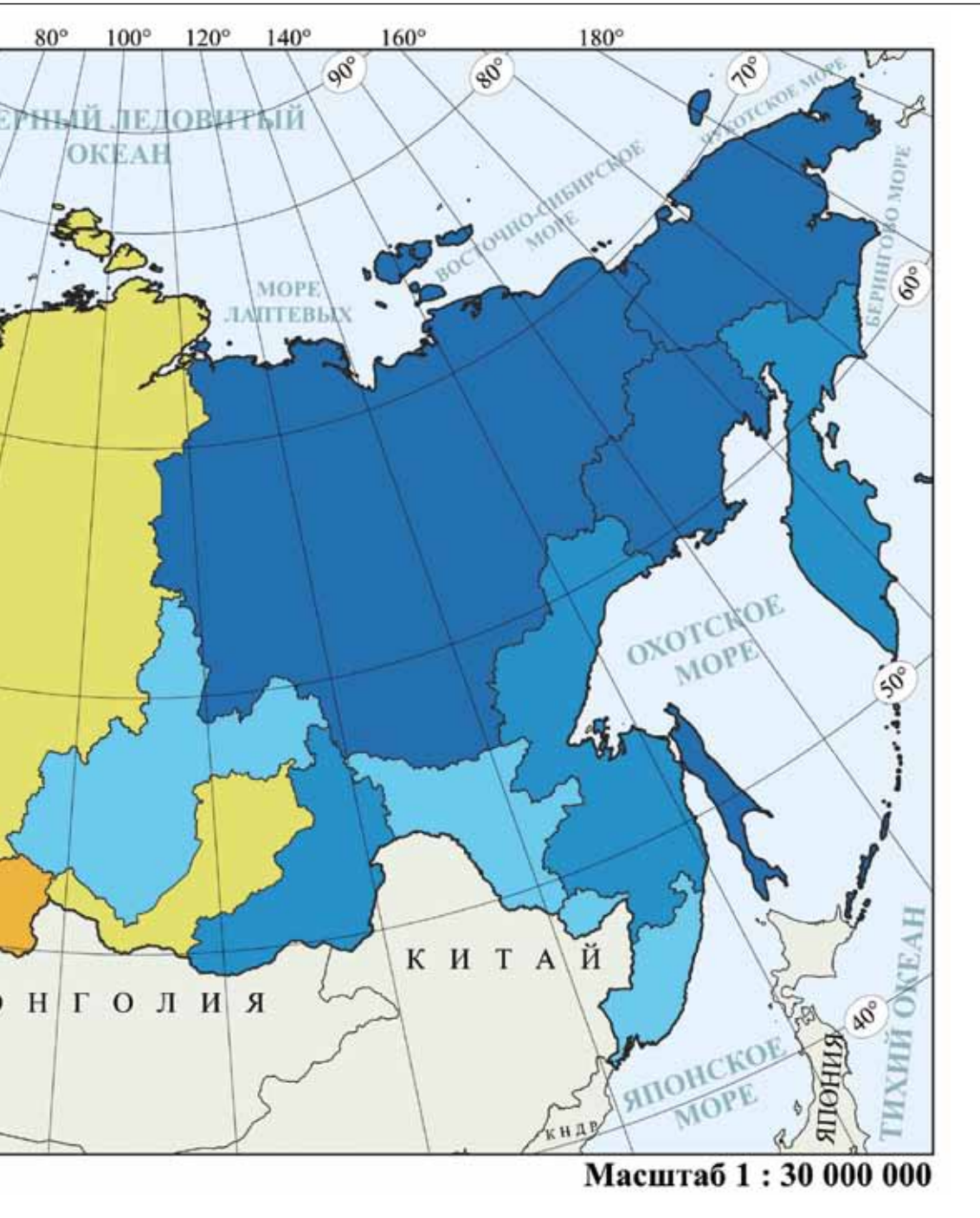


Рис. 1. Миграционный прирост в городской местности России, 1994.

Fig. 1. Migration growth in urban areas of Russia, 1994.



Источник:
Source:

составлено авторами по данным [23].
compiled by the authors according to data [23].

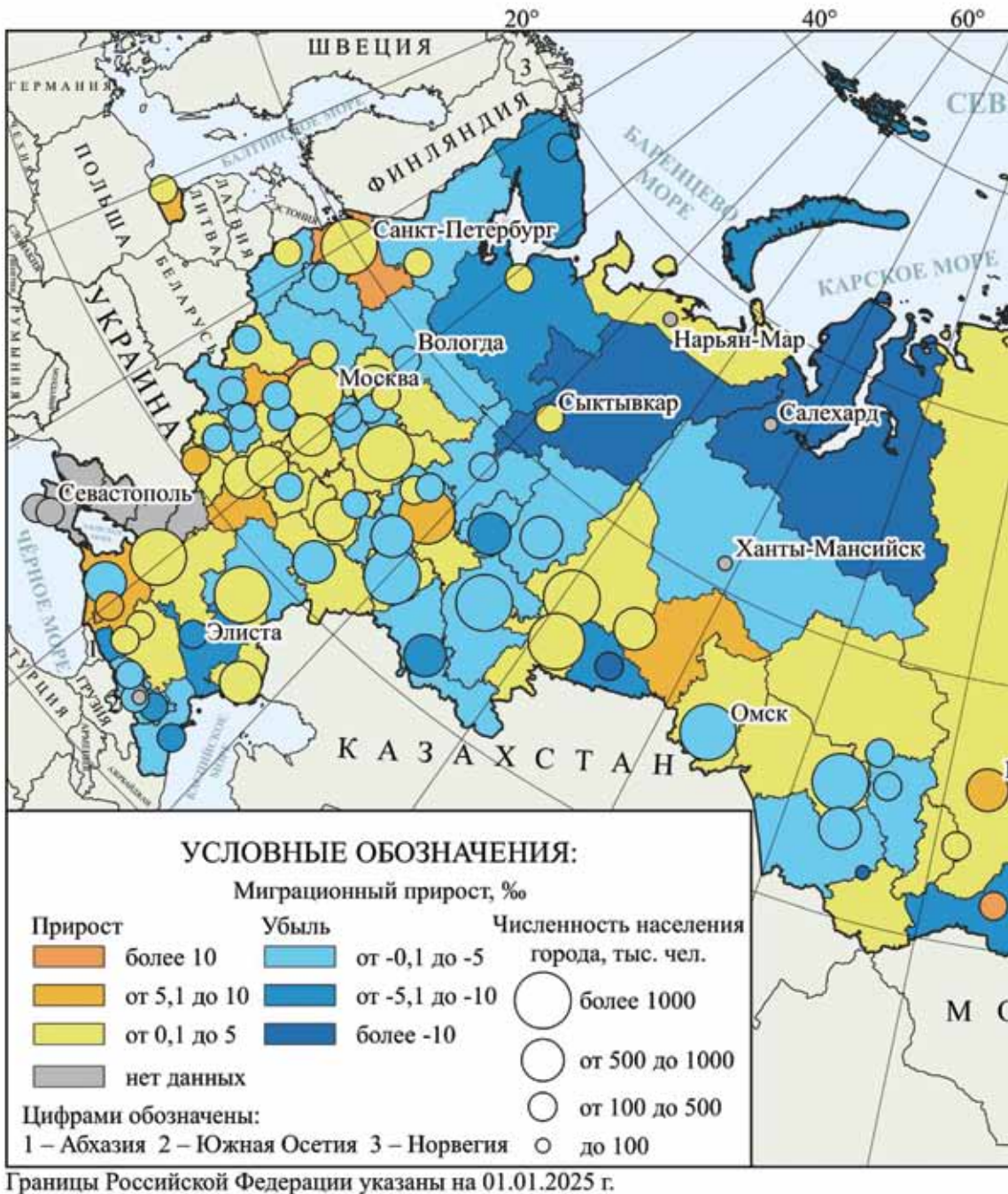
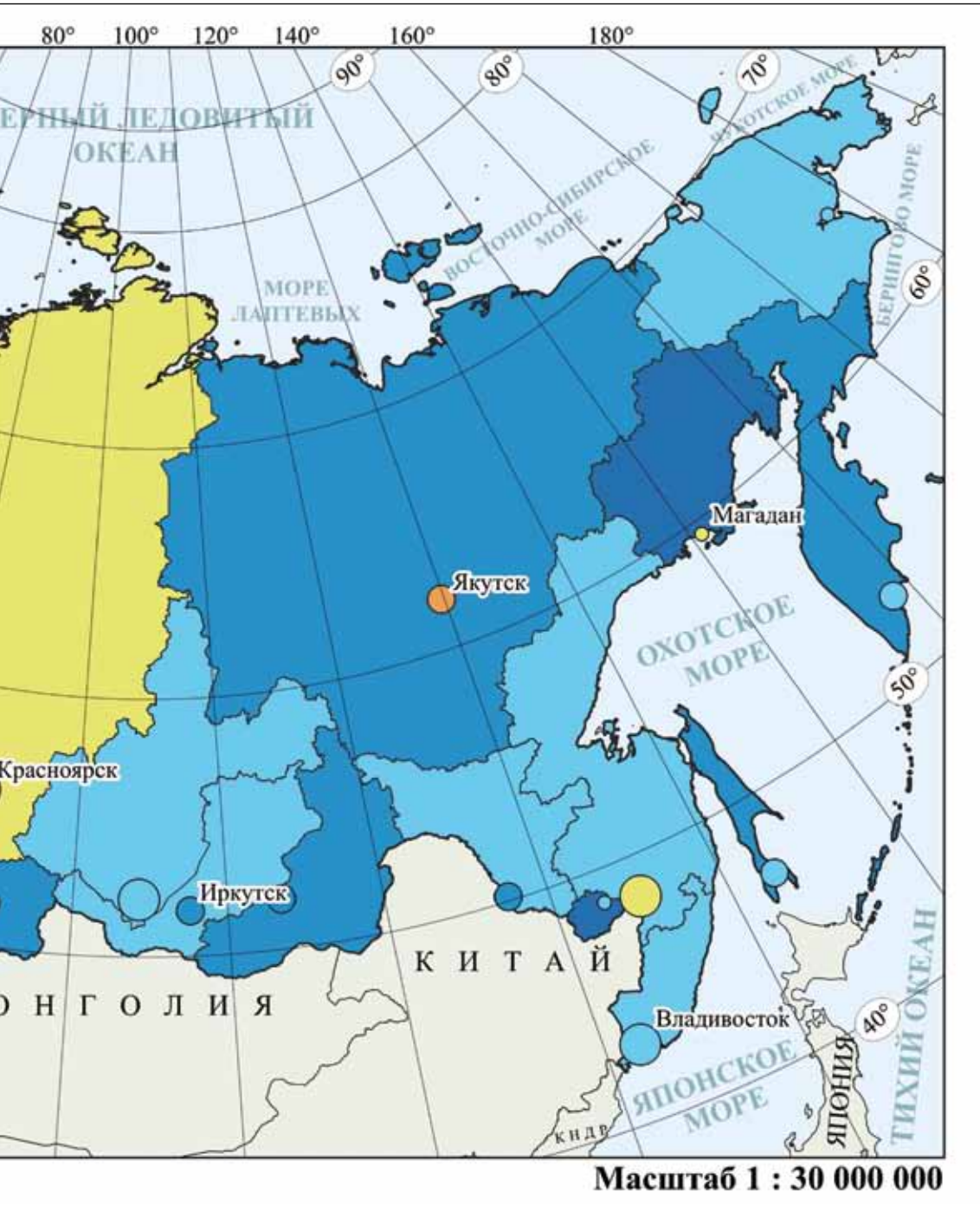


Рис. 2.

Миграционный прирост в городской местности и региональных столицах России, 2004.

Fig. 2. Migration growth in urban areas and regional capitals of Russia, 2004.



Источник:
Source:

составлено авторами по данным [23]
compiled by the authors according to data [23]

и Дальнего Востока, а из Приволжья и Северного Кавказа [27, 28]. Города по-прежнему концентрируют весь миграционный прирост в стране. Доминируют регионы со средним и низким уровнем миграционного прироста в городской местности (60%). Состав регионов с высоким миграционным приростом (Московская, Ленинградская области, Краснодарский край, Калининградская, Тюменская области) по известным событиям на Украине дополняется Курской, Белгородской, Воронежской областями. В этот период высокий миграционный прирост отмечается в городской местности 20% регионов страны. Примечательно, что положительный миграционный прирост отмечается в городской местности некоторых регионов Дальнего Востока (Приморский, Хабаровский края, Амурская, Сахалинская области), а также Сибири (Тюменская, Томская, Кемеровская области, Республика Алтай).

При этом в региональных столицах страны ситуация значительно изменилась – выросла миграционная привлекательность. Почти в 1/3 региональных столиц миграционный прирост был средним и превышал этот показатель по городской местности соответствующего региона – Центральная Россия (Курск, Белгород, Калуга, Рязань, Воронеж), Урал и Поволжье (Екатеринбург, Пермь, Казань, Челябинск), Сибирь и Дальний Восток (Новосибирск, Кемерово, Якутск, Челябинск и др.). Примерно в 1/3 городов, как и в городской местности соответствующего региона, отмечался низкий уровень миграционного прироста. Эта категория центров также располагалась в разных регионах страны – Центральная Россия (Брянск, Иваново, Ярославль и др.), Поволжье и Урал (Самара, Нижний Новгород, Уфа, Ульяновск, Саратов, Волгоград и др.), Сибирь и Дальний Восток – Улан-Удэ, Хабаровск, Благовещенск, Ханты-Мансийск, Биробиджан и др.). Остальные региональные столицы теряли население в ходе миграции, как и в целом, городская местность этих регионов. При этом в некоторых столицах сохраняется устойчивая миграционная убыль населения (Кызыл, Нальчик, Махачкала, Грозный, Салехард) (рис. 3).

В настоящее время, в условиях снижения общего миграционного прироста в стране, сохраняется тенденция сокращения зоны с положительным сальдо миграции в Европейской части страны

за счет областей, граничащих с Украиной, Белоруссией, странами Балтии, регионов Поволжья. Зона с положительным сальдо миграции в городской местности расширяется за счет сибирских и дальневосточных регионов. Но положительное сальдо миграции отмечается в городской местности только в половине регионов страны. Практически не меняется список регионов с высоким миграционным приростом в городской местности (Московская, Ленинградская области, Краснодарский край, Ханты-Мансийский автономный округ и др.).

Сокращение миграционного прироста в стране сказалось на результатах миграционных процессов в столичных центрах – более половины региональных столиц имеют низкий показатель миграционной убыли – города Центральной России (Тула, Владимир, Липецк, Воронеж, Тамбов и др.), Поволжья (Волгоград, Самара, Саратов и др.), республик Северного Кавказа (Махачкала, Грозный, Черкесск), Сибири (Омск, Кемерово, Новосибирск и др.). В десяти региональных столицах отмечается высокий уровень миграционной убыли населения – Махачкале, Грозном, а также Майкопе, Астрахани, Горно-Алтайске, Белгороде, Калуге, Орле. В последних трех региональных столицах миграционная ситуация осложняется близостью военных событий.

В 1/3 региональных столиц сальдо миграции положительное, при этом высокий миграционный прирост отмечается в 10% региональных столиц (Краснодар, Ставрополь, Севастополь, Нарьян-Мар), а средний уровень миграционного прироста отмечается в Ростове-на-Дону, Красноярске, Якутске, Уфе) (рис. 4).

Как показали исследования, миграционная карта региональных столиц страны за постсоветский период заметно менялась.

Моделирование миграционных процессов с помощью центрографического метода показало траекторию перемещения центра по выбытию мигрантов в России: в 1992 г. он находился на юге Якутии, в настоящее время – на границе регионов Урала и Поволжья. По прибытию мигрантов центр перемещается вокруг столичного региона, который концентрирует основную часть миграционного потока страны.

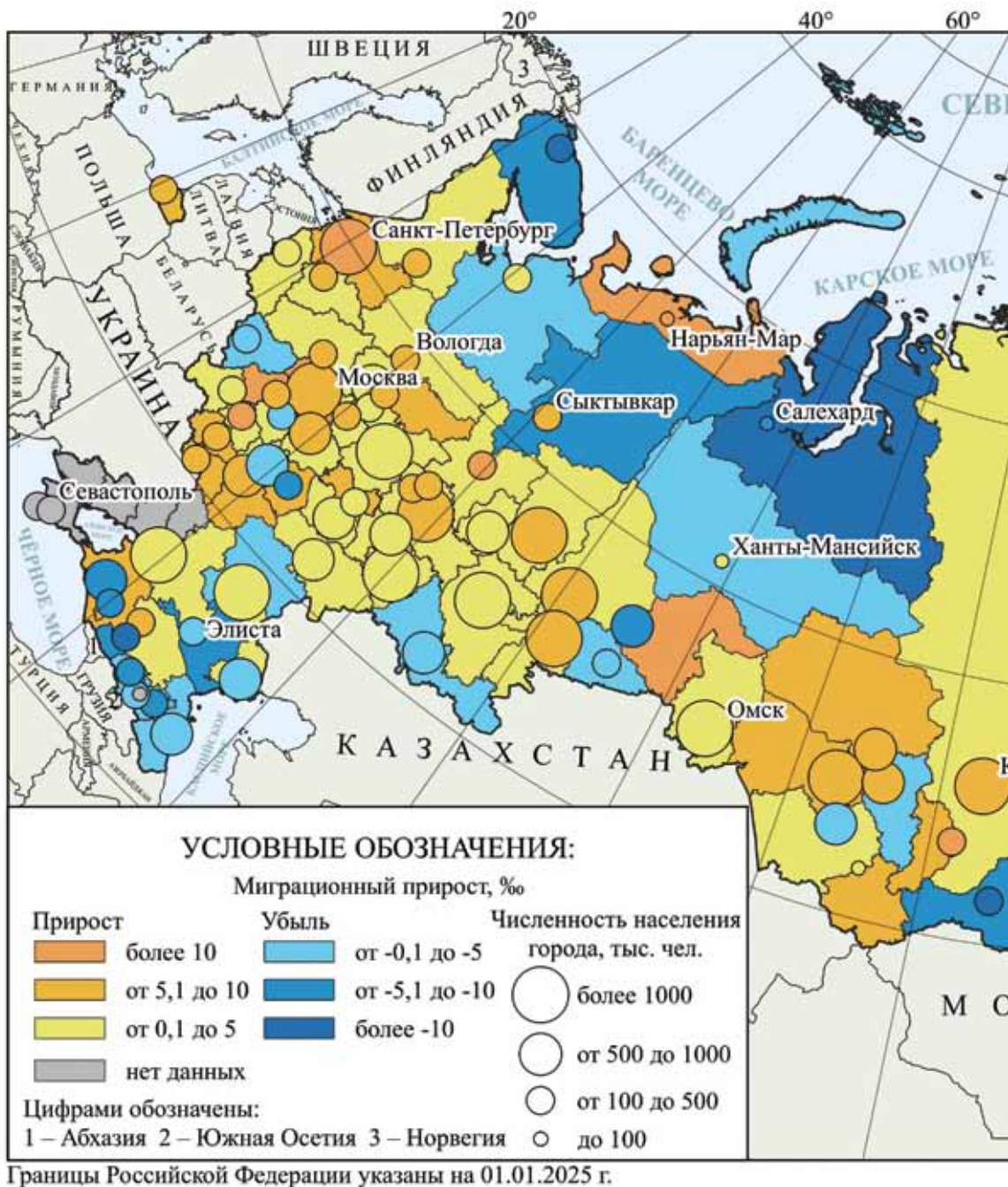
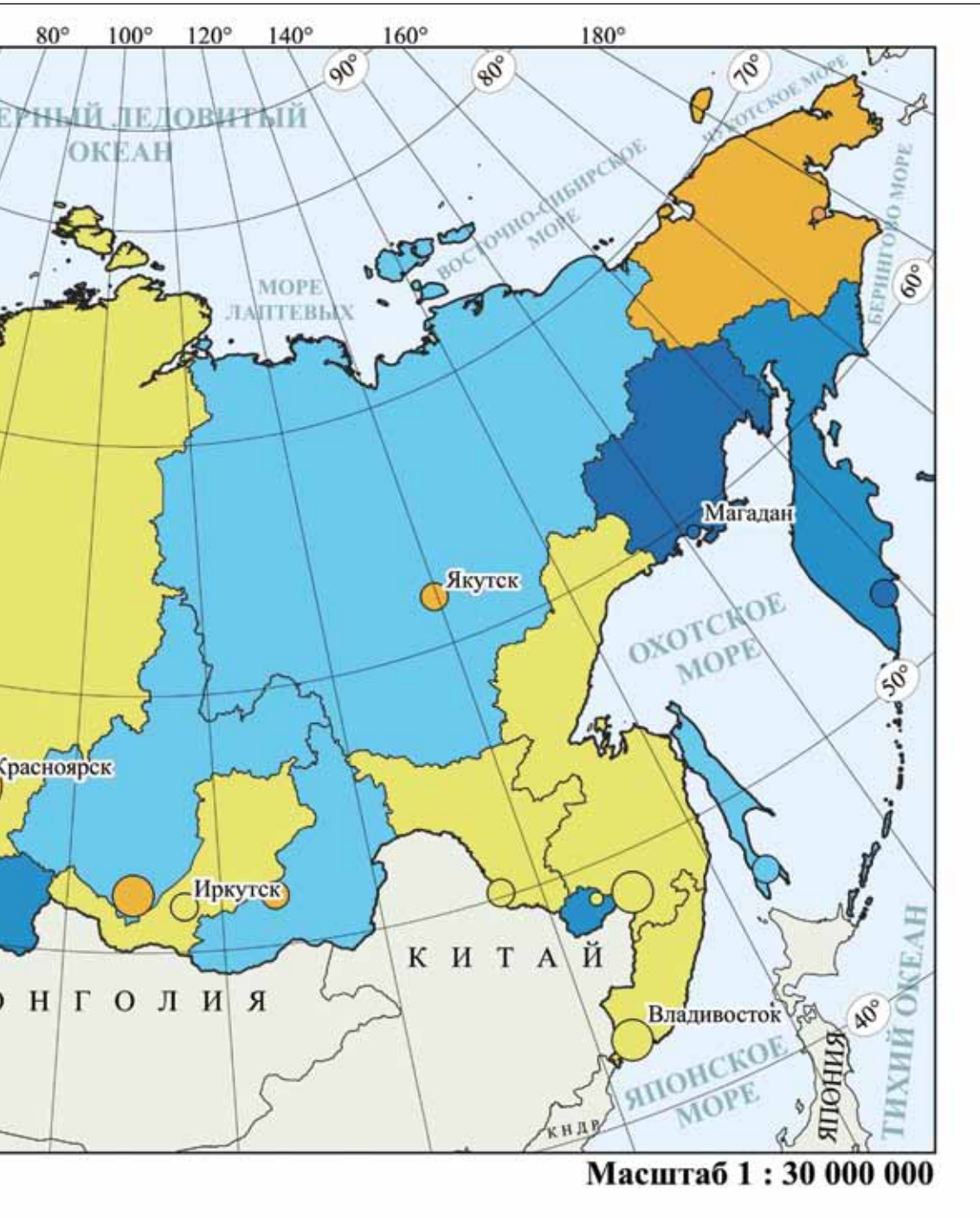


Рис. 3.

Миграционный прирост в городской местности и региональных столицах России, 2014.

Fig. 3. Migration growth in urban areas and regional capitals of Russia, 2014.



Источник:
Source:

составлено авторами по данным [23].
compiled by the authors according to data [23].

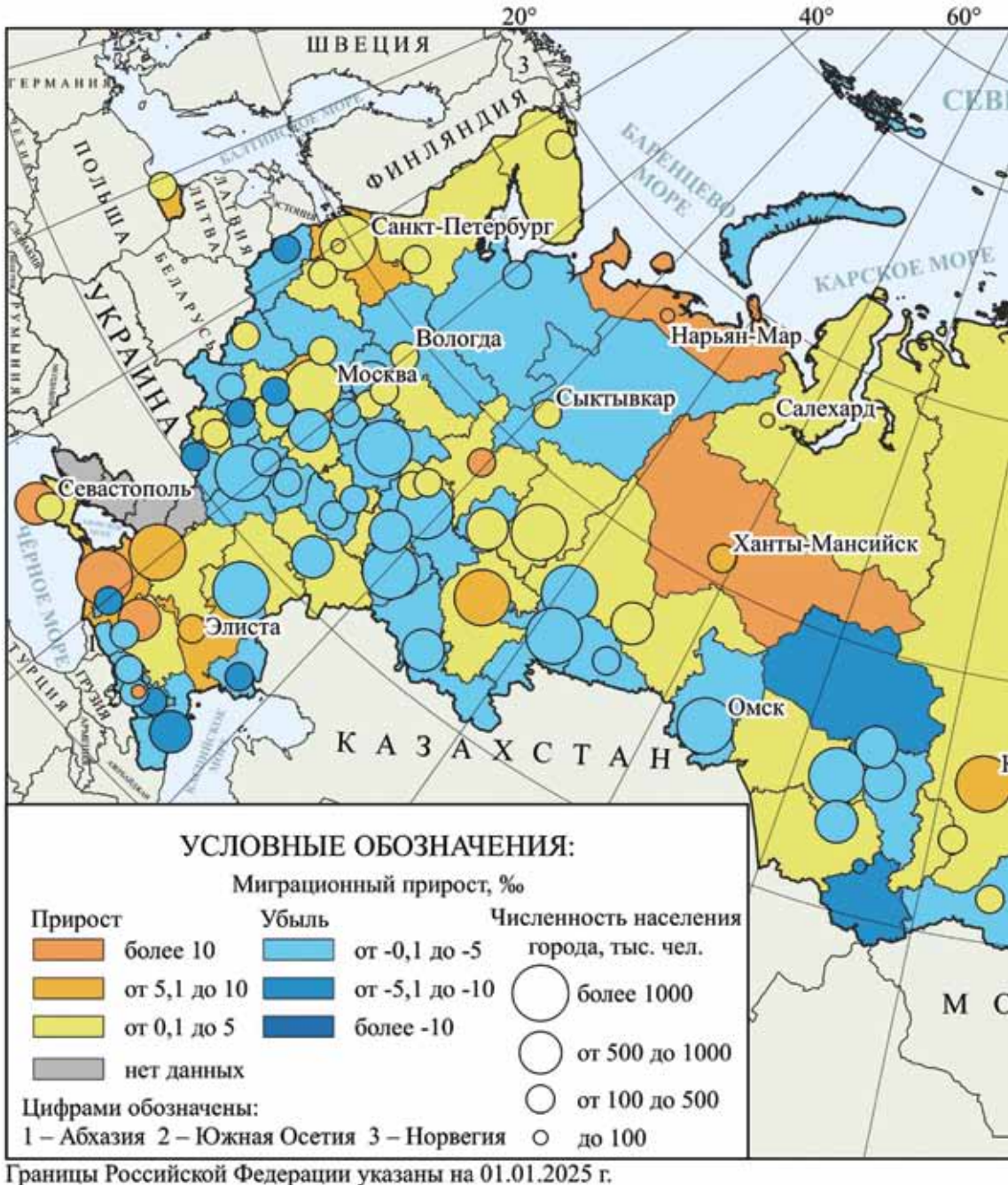


Рис. 4.

Миграционный прирост в городской местности и региональных столицах России, 2023.

Fig. 4. Migration growth in urban areas and regional capitals of Russia, 2023.



Источник:
Source:

составлено авторами по данным [23].
compiled by the authors according to data [23].

Заключение

1. В новых геополитических и социально-экономических условиях в России меняется характер, масштабы и география миграционных потоков – восточный миграционный тренд сменился на западный. И регионы, которые отдавали мигрантов с пореформенного времени, стали получать мигрантов. По характеру миграционных процессов регионы дифференцированы, выделяются территории с устойчивым миграционным приростом (Москва, Московская, Ленинградская области, Краснодарский край, Ханты-Мансийский округ) и традиционно теряющие население в ходе миграции (Дагестан, Чечня, Тыва и др.). В городской местности большинства регионов миграционная ситуация имела неустойчивый характер.
2. Миграционная ситуация в региональных столицах, как правило повторяет тенденции регионов, но с более высокими показателями.
3. Моделирование с помощью центрографического метода миграционных процессов в городской местности России позволило выявить тренды смещения центра миграции по выбытию с восточного на западный, но в последние десятилетия скорость его смещения замедлилась.

Список источников

1. Махрова А. Г., Нефедова Т. Г., Трейвиш А. И. Поляризация пространства Центрально-Российского мегалополиса и мобильность населения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 5. С. 77–85.
2. Тиникова Е. Е. Социальная инфраструктура городов Хакасии – фактор миграции населения? // Ойкумена. Регионоведческие исследования. 2023. № 4. С. 36–42. <https://doi.org/10.24866/1998-6785/2023-4/36-42>
3. Гонтарь Н.В. Миграционный фактор динамики городского населения Ростовской области // Социально-экономическая география: теория, методология и практика преподавания.

- давания: материалы Всероссийской научно-практической конференции «Десятые Максаковские чтения». М.: Сам Полиграфист, 2024. С. 196-205.
4. Мухаметдинова С. Х., Тюменцева Е. Ю. Когнитивное моделирование влияния экономических и социальных факторов на уровень молодежной миграции (на примере города Омска) // *Фундаментальные исследования*. 2022. №9. С. 54–59.
 5. Ахметова Г. Ф. Тренды миграции в городе Уфе: историческая ретроспектива и современность // *Экономика и управление: научно-практический журнал*. 2024. № 5. С. 147–154. <https://doi.org/10.34773/EU.2024.5.25>
 6. Мкртчян Н. В., Флоринская Ю. Ф. Жители малых и средних городов России: трудовая миграция как альтернатива безвозвратному отъезду // *Журнал Новой экономической ассоциации*. 2019. № 3 (43). С. 78–94.
 7. Бедретдинова Е. О. Социально-экономические последствия миграции для развития малых городов // *Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования*. 2013. №2. С. 37–42.
 8. Роговая А. В., Левченко Н. В. Образование, занятость и досуг как факторы миграции молодёжи из малых городов // *Ойкумена. Регионоведческие исследования*. 2020. №4. С. 23–33. <https://doi.org/10.24866/1998-6785/2020-4/23-33>
 9. Аксянова А. В., Чехломин С. В. Методы оценки экономической привлекательности моногородов для населения // *Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки*. 2018. № 2. С. 52–58. <https://doi.org/10.21603/2500-3372-2018-2-52-58>
 10. Мкртчян Н. В. Миграция молодежи в региональные центры России в конце XX – начале XXI века // *Известия РАН. Серия Географическая*. 2013. № 6. С. 19–32.
 11. Мкртчян Н. В. Внутривосточная миграция в региональных столицах и нестоличных территориях // *Научные труды: ИНП РАН*. М.: МАКС Пресс, 2018. Т.16. С. 568–585.
 12. Мкртчян Н. В. Миграция и субурбанизация в региональных столицах и пригородных территориях России // «Пригородная революция» в региональном срезе: периферийные городские территории на постсоветском пространстве: сборник тезисов докладов международной научной кон-

- ференции (Улан-Удэ, 14-16 ноября 2019 г.). В 2 ч. Улан-Удэ: Бурятский научный центр Сибирского отделения РАН, 2019. С. 14–21. <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0571-1-2019-1-14-21>
13. Карачурина Л. Б., Мкртчян Н. В., Петросян А. Н. Пространственные особенности миграционного прироста пригородов региональных столиц России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2021. № 6. С. 123–134.
 14. Сопнев Н. В., Белозеров В. С. Миграционные процессы в региональных столицах Юга Европейской России // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2021. Том 7 (17). Вып. 4. С. 103–117.
 15. Винокурова А. В., Яковлев А. И. Региональные столицы Дальнего Востока: уехать нельзя остаться (Где поставим запятую?) // Respublica Literaria. 2022. Т. 3. № 1. С. 67–80. <https://doi.org/10.47850/RL.2022.3.1.67-80>
 16. Звонковский В. Б., Меркулова Д. Ю., Соловьева Ю. В. Жители новых российских пригородов: «чужие» или «свои»? // Социологический журнал. 2015. Т. 21. № 4. С. 61–79.
 17. Григоричев К. В. Субрегиональные миграции и формирование пригородов сибирского города // Улкен Алтай элемі – Мир Большого Алтая – World of Great Altay. 2017. № 3(1). С. 31–42.
 18. Newbold K. B. Migration Up and Down Canada's Urban Hierarchy // Canadian Journal of Urban Research. 2011. No. 20 (1). P. 131-149.
 19. De Jong P. A., Brouwer A. E., McCann P. Moving up and down the urban hierarchy: age-articulated interregional migration flows in the Netherlands // The Annals of Regional Science. 2016. Vol. 57(1). P. 145-164. <https://doi.org/10.1007/s00168-016-0772-7>
 20. Kotsubo M., Nakaya T. Moving up and down the urban hierarchy: Agespecific internal migration patterns in Japan based on the 2020 census. Population, Space and Place, 2024. <https://doi.org/10.1002/psp.2786> Web resource: <https://www.researchgate.net/publication/382073315> (accessed 20.10.2025)
 21. Wang X., Qi W., Liu S. et al. The settlement intention of urban-to-urban migrants in China: Spatial differences and driving factors // Journal of Geographical Sciences. 2022. No. 32 (12). P. 2503-2524. <https://doi.org/10.1007/s11442-022-2058-6>
 22. Численность и миграция населения Российской Феде-

- рации в 1994, 2004, 2014, 2023 гг. [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13283> (дата обращения: 13.03.2025)
23. Миграционный прирост населения по городам с числом жителей 100 тыс. человек и более. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/36719> (дата обращения: 13.03.2025)
24. Численность постоянного населения на 1 января. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/31557> (дата обращения: 13.04.2025)
25. Население России 1995: третий ежегодный демографический доклад. М., 1995. 112 с.
26. Население России 2007: пятнадцатый ежегодный демографический доклад. М., 2009. 296 с.
27. Население России 2012: двадцатый ежегодный демографический доклад. М., 2014. 412 с.
28. Население России 2016: двадцать четвертый ежегодный демографический доклад. М., 2018. 448 с.

References

1. Makhrova AG, Nefedova TG, Treivish AI. The Central Russian megalopolis: polarization of space and population mobility. *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography*. 2016;(5):77-85. (in Russ.).
2. Tinikova EE. Social infrastructure of towns in Khakassia – factor of population migration? *Ojkumena. Regional researches*. 2023;(4):36–42. (in Russ.). <https://doi.org/10.24866/1998-6785/2023-4/36-42>
3. Gontar NV. Migration factor of urban population dynamics in the Rostov region. *Socio-economic geography: theory, methodology and teaching practice: Materials of the All-Russian scientific and practical conference «The Tenth Maksakov Readings»*. Moscow: Sam Polygraphist; 2024. P. 196-205. (in Russ.).
4. Mukhametdinova SKh., Tyumentseva EYu. Cognitive Modeling of the Influence of Economic and Social Factors on the Level of Youth Migration (by the Example of the City of Omsk). *Fundamental Research*. 2022;(9): 54-59. (in Russ.).
5. Akhmetova GF. Migration trends in Ufa: historical retrospect and modernity. *Economics and Management: a scientific and practical journal*. 2024;(5):147-154. (in Russ.). <https://doi.org/10.34773/EU.2024.5.25>
6. Mkrtychyan NV., Florinskaya YuF. Residents of Small and Me-

- dium-Sized Cities in Russia: Labor Migration as an Alternative to Permanent Departure. *Journal of the New Economic Association*. 2019;3(43): 78-94. (in Russ.).
7. Bedretdinova EO. Social and economic consequences of migration for the development of small towns. *Innovative economy: prospects for development and improvement*. 2013;(2):37-42. (in Russ.).
 8. Rogovaya AV, Levchenko NV. Education, employment and leisure as factors of youth migration from small towns. *Ojkumena. Regional researches*. 2020;(4):23-33. (in Russ.). <https://doi.org/10.24866/1998-6785/2020-4/23-33>
 9. Aksyanova AV., Chekhlomin SV. Methods of Assessing the Economic Attractiveness of Single-Industry Towns for the Population. *Bulletin of Kemerovo State University. Series: Political, Sociological, and Economic Sciences*. 2018; (2): 52-58. (in Russ.). <https://doi.org/10.21603/2500-3372-2018-2-52-58>
 10. Mkrtchyan NV. Migration of Youth to Regional Centers of Russia at the End of the 20th – the Beginning of the 21st Century. *Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Series Geographical*. 2013;(6):19-32. (in Russ.).
 11. Mkrtchyan NV. Intra-Russian Migration in Regional Capitals and Non-Capital Territories. *Scientific Works: INP RAS*. Moscow: MAKS Press. 2018;(16):568-585. (in Russ.).
 12. Mkrtchyan NV. Migration and Suburbanization in the Regional Capitals and Suburban Territories of Russia. "Suburban Revolution" in the Regional Context: Peripheral Urban Territories in the Post-Soviet Space: the collection of Abstracts of the International Scientific Conference (Ulan-Ude, November 14-16, 2019). In 2 parts. Ulan-Ude: Buryat Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2019. P. 14–21. (in Russ.). <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0571-1-2019-1-14-21>
 13. Karachurina LB, Mkrtchyan NV, Petrosyan AN. Spatial Features of the Migration Growth of the Suburbs of Russia's Regional Capitals. *Moscow University Bulletin. Series 5. Geography*. 2021;(6):123-134. (in Russ.).
 14. Sopnev NV, Belozerov VS. Migration Processes in the Regional Capitals of the South of European Russia. *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*. 2021;7(17)4:103-117. (in Russ.).
 15. Vinokurova AV, Yakovlev AI. Regional Capitals of the Russian Far East: To Leave or to Stay (Where to Put a Comma?).

- Respublica Literaria. 2022;3(1): 67-80. (in Russ.). <https://doi.org/10.47850/RL.2022.3.1.67-80>
16. Zvonovsky VB, Merkulova DYu, Solovyova YuV. Residents of New Russian Suburbs: "Strangers" or "Ourselves"? Sociological Journal. 2015;21(4):61-79. (in Russ.).
 17. Grigorichev KV. Subregional migrations and the formation of suburbs in a Siberian city. World of Great Altay. 2017;3(1):31-42. (in Russ.).
 18. Newbold KB. Migration Up and Down Canada's Urban Hierarchy. Canadian Journal of Urban Research. 2011;20(1):131-149.
 19. De Jong PA, Brouwer AE, McCann P. Moving up and down the urban hierarchy: age-articulated interregional migration flows in the Netherlands. The Annals of Regional Science. 2016; 57(1):145-164. <https://doi.org/10.1007/s00168-016-0772-7>
 20. Kotsubo M, Nakaya T. Moving up and down the urban hierarchy: Agespecific internal migration patterns in Japan based on the 2020 census. Population, Space and Place. 2024. DOI:10.1002/psp.2786 Available from: <https://www.researchgate.net/publication/382073315> [Accessed 05 June 2025].
 21. Wang X, Qi W, Liu S et al. The settlement intention of urban-to-urban migrants in China: Spatial differences and driving factors. Journal of Geographical Sciences. 2022;32(12):2503-2524. <https://doi.org/10.1007/s11442-022-2058-6>
 22. Population size and migration in the Russian Federation in 1994, 2004, 2014, and 2023. Available from: <https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13283> [Accessed 13 March 2025]. (In Russ.).
 23. Migration growth in cities with a population of 100,000 or more. Available from: <https://www.fedstat.ru/indicator/36719> [Accessed 13 March 2025]. (In Russ.).
 24. The number of permanent residents as of January 1. Available from: <https://www.fedstat.ru/indicator/31557> [Accessed 23 April 2025]. (In Russ.).
 25. Population of Russia 1995: Third Annual Demographic Report. Moscow; 1995. 112 p. (In Russ.).
 26. Population of Russia 2007: Fifteenth Annual Demographic Report. Moscow; 2009. 296 p. (In Russ.).
 27. Population of Russia 2012: Twentieth Annual Demographic Report. Moscow; 2014. 412 p. (In Russ.).
 28. Population of Russia 2016: Twenty-Fourth Annual Demographic Report. Moscow; 2018. 448 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Виталий Семенович Белозеров – доктор географических наук, профессор, профессор департамента географии и геоинформатики факультета международных отношений Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 24464148100

Данил Геннадьевич Акинин – аспирант департамента географии и геоинформатики факультета международных отношений Северо-Кавказского федерального университета

Юлия Федоровна Зольникова – кандидат географических наук, доцент, доцент департамента географии и геоинформатики факультета международных отношений Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 57219554702

Вклад авторов

Все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Information about the authors

Vitaly S. Belozero – Dr. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Professor of the Department of Geography and Geoinformatics, Faculty of International Relations, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 24464148100

Danil G. Akinin – graduate student, Department of Geography and Geoinformatics, Faculty of International Relations, North-Caucasus Federal University

Julia F. Zolnikova – Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geography and Geoinformatics, Faculty of International Relations, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 57219554702

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.



Научная статья

УДК 551.583

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.2>

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УСЛОВИЯ ПРОИЗВОДСТВА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ В КБР

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

^{1,3,4,5} Высокотемпературный геофизический институт (д. 2, пр. Ленина, 360001, Нальчик, Российская Федерация)

² Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН (д. 37А, ул. И. Арманд, 360000, Нальчик, 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.

Объектом исследования являются изменения регионального климата, его влияние на производство с/х культур и создание модели урожайности озимой пшеницы в условиях степной зоны Кабардино-Балкарской Республики (КБР). Исследование построено на анализе климатических изменений на степной метеостанции Прохладная (КБР). В период 1961–2024 г. увеличение среднегодовых температур составило 0,37 °C/10 лет ($D = 46\%$) с наибольшей скоростью роста в летний сезон (0,48 °C/10 лет, $D = 50\%$). В исследуемый период имела место незначительная положительная тенденция годовых и сезонных сумм осадков, за исключением летнего сезона (уменьшение на 5,2 мм/10 лет) и весеннего сезона с 1976 года (уменьшение на 0,18 мм/10 лет), когда необходима достаточная влагообеспеченность почвы. В результате исследования получено, что климатические изменения в степной зоне Кабардино-Балкарии проявляются в возрастании продолжительности и интенсивности жаркой погоды. Происходит небольшое уменьшение осадков летом при одновременном увеличении интенсивности ливневых осадков, возрастает засушливость в летний период. Поскольку урожайность с/х культур зависит от взаимодействия различных факторов окружающей среды и специфических характеристик каждого вида растения, то в данной работе предложен новый подход к улучшению информационного обеспечения задачи снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с нехваткой влаги в почве на примере степной зоны КБР. Этот подход заключается в исполь-

зовании значений коэффициентов влагообеспеченности почвы, рассчитанных по данным среднемесячных сумм осадков в марте, апреле, мае и в летнем сезоне, и среднемесячной температуры в эти же периоды за 1961–2024 гг. на м/станции Прохладная. Используя метод наименьших квадратов получены параметры фактического уравнения для расчета урожайности озимой пшеницы. Результаты корреляционного анализа между фактическими и расчетными значениями урожайности на 1%-ном уровне значимости ($r = 0,54$, $\text{Sig.} = 0,001 < p = 0,01$) показали хорошее соответствие между фактическими значениями урожайности и модельными, рассчитанными по формуле модели. Новая мультипликативная модель урожайности озимых культур может быть использована для оценки изменений урожайности озимых культур в зависимости от изменения температуры, осадков, увлажнения почвы в летний и весенний сезоны на период упреждения.

Ключевые слова: сезонные и годовые температуры, суммы осадков, Кабардино-Балкарская республика, степная зона, агроклиматические ресурсы, озимые культуры, мультипликативная модель

Для цитирования: Ашабоков Б.А., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Влияние климатических факторов на условия производства сельскохозяйственной продукции в КБР // Наука. Инновации. Технологии. 2025. №4. С. 47–68. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.2>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 23.07.2025;
одобрена после рецензирования 31.11.2025;
принята к публикации 15.12.2025.

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

The influence of climatic factors on the conditions of agricultural production in the Kabardino-Balkarian Republic

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 av, 360030, Nalchik, Russian Federation)

² Institute of Informatics and Regional Management Problems of the KBSC RAS (37A, I. Armand St., 360000, Nalchik, Russian Federation)
^{1,2} ashabokovboris@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 object of the study is the changes in the regional climate, its impact on the production of agricultural crops and the creation of a model of winter wheat yield in the steppe zone of the Kabardino-Balkarian Republic (KBR). The study is based on the analysis of climate changes at the steppe meteorological station Prokhladnaya (KBR). In the period 1961–2024 the increase in average annual temperatures was $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ years}$ ($D = 46\%$) with the highest growth rate in the summer season ($0.48\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ years}$, $D = 50\%$). During the study period, there was a slight positive trend in annual and seasonal precipitation amounts, with the exception of the summer season (a decrease of $5.2\text{ mm}/10\text{ years}$) and the spring season since 1976 (a decrease of $0.18\text{ mm}/10\text{ years}$), when sufficient soil moisture is needed. It was found that climatic changes in the steppe zone of Kabardino-Balkaria are manifested in an increase in the duration and intensity of hot weather. There is a slight decrease in precipitation in summer with a simultaneous increase in the intensity of heavy rainfall, and aridity increases in summer. Since the yield of agricultural crops depends on the interaction of various environmental factors and the specific characteristics of each plant species, this paper proposes a new approach to improving the information support for the task of reducing risks in agriculture, associated with a lack of moisture in the soil using the steppe zone of the KBR as an example. This approach involved using the values of the soil moisture supply coefficients calculated based on average monthly precipitation in March, April, May and in the summer season, and average monthly temperature in the same periods for 1961–2024 at the Prokhladnaya station. Using the least squares method, the parameters of the actual equation for calculating the yield of winter wheat were obtained. The results of the correlation analysis between the actual and estimated yield values at a 1% significance level ($r = 0.54$, $\text{Sig.} = 0.001 < p = 0.01$) showed good agreement between the actual yield values and the model ones calculated using the model formula. The new multiplicative model of winter crop yield can be used to assess changes in the yield of winter crops depending on changes in temperature, precipitation, and soil moisture in the summer and spring seasons for the lead period.

Keywords:

seasonal and annual temperatures, precipitation amounts, Kabardino-Balkarian Republic, steppe zone, agroclimatic resources, winter crops, multiplicative model

For citation:

Ashabakov BA, Tashilova AA, Kesheva LA, Teunova NV. The influence of climatic factors on the conditions of agricultural production in the Kabardino-Balkarian Republic. *Science. Innovations. Technologies.* 2025;(4):47-68. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.2>

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

The article was submitted 23.07.2025;
approved after reviewing 31.11.2025;
accepted for publication 15.12.2025.

Введение

Современная тенденция к потеплению, особенно в сельскохозяйственных регионах, усиливает интерес к исследованиям, связанным с изменением климата, агроклиматическими ресурсами и их составляющей – продуктивности сельскохозяйственных культур.

Во многих работах вопросы современного устойчивого развития регионов приобрели особую актуальность в последние десятилетия, когда климатические характеристики и агроклиматические ресурсы начали испытывать значительные изменения [1, 2, 3]. Зависимость от погодных условий делает производство сельскохозяйственной продукции неустойчивым. Решение проблемы анализа изменения климата, исследования возможных последствий этих изменений с целью адаптации к ним, в первую очередь сельского хозяйства, связано с разработкой эффективных методов детальной оценки и использования агроклиматических ресурсов.

Изучение влияния изменения регионального климата на производство с/х культур проводится многими исследователями с использованием разнообразных подходов [4, 5, 6], но лишь немногие рассматривали реализацию стратегии адаптации [7, 8].

По данным из Доклада Росгидромета [9] на территории России продолжается потепление, темпы которого намного превышают среднеглобальные. В период с 1976 по 2024 г. скорость роста осредненной по России среднегодовой температуры (линейный тренд) составила $+0,50^{\circ}\text{C}/10$ лет (вклад в общую изменчивость 60%), что более чем в два с половиной раза больше скорости роста глобальной температуры за тот же период.

Потепление наблюдается на всей территории России во все сезоны. Максимум летнего потепления отмечается на юге европейской части России (ЕЧР): $0,73^{\circ}\text{C}/10$ лет для ЮФО и $0,62^{\circ}\text{C}/10$ лет для СКФО. При этом за последние десять лет количество летних осадков снизилось на 4,8%, что наряду с ростом температуры увеличивает риск наступления засухи, приводящей к негативным последствиям для аграрного сектора.

Из работ авторов, посвященных исследованию изменений этих факторов на Северном Кавказе, можно отметить [7, 10, 11].

В работах [10, 11] приведены результаты анализа изменений режима атмосферных осадков и температурного режима воздуха, определены экстремальные значения, сделан прогноз и рассмотрены проблемы адаптации аграрно-промышленного комплекса к изменению климата на юге европейской территории России. Кроме этого, определялись значения гидротермического коэффициента увлажнения почвы [12] на отрезке времени 1961–2022 гг. По результатам исследований, на территории данного региона, который играет заметную роль в обеспечении продовольственной безопасности РФ, наблюдается ухудшение условий производства сельскохозяйственной продукции, связанное с уменьшением влагосодержания. Если тенденции в динамике данного показателя сохранятся, то регион окажется в зоне средней и сильной засухи. Влияние изменения климата на функционирование данной отрасли также может осуществляться посредством экстремальных погодных явлений, частота и мощность которых увеличиваются вследствие изменения климата. В условиях Северного Кавказа наиболее важными из них являются засухи и градобития, высокие температуры.

Имеются различные подходы исследователей в создании моделей урожайности в условиях изменения климата [13–17]. В работах [13, 14], используя имитационную модель Климат – Почва – Урожай, приводятся оценки изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в земледельческой зоне России. В работе [15] предлагается метод прогнозирования урожайности пшеницы, картофеля и овощей по многоспектральным космическим изображениям с использованием реальных статистических данных по урожайности для различных сельскохозяйственных культур и разных областей страны. Недостатком модели является то, что осуществляемый прогноз урожайности является краткосрочным (на срок в среднем около месяца). В работе [16] рассматривается влияние комплекса метеорологических факторов (весенние и летние осадки и количество дней апреля с температурой ниже 0 °С) на формирование урожайности зерновых культур средней полосы России на примере озимой пшеницы и ярового ячменя. Прогнозирования урожайности озимой пшеницы и ярового ячменя осуществляется с помощью линейной регрессии. В работе [17] приводится

количественная оценка откликов урожайности некоторых с/х культур на возможные климатические изменения до конца XXI века при реализации климатического сценария RCP 4.5 (сценарий умеренных изменений климата; он предполагает стабилизацию концентрации парниковых газов к середине XXI века за счёт внедрения энергоэффективных технологий и частичного перехода на возобновляемые источники энергии). Установлено, что около 60% межрегиональной изменчивости урожайности зерновых и зернобобовых культур в целом по России объясняется основными климатическими факторами: температурой воздуха и осадками.

Основным условием для посевов озимых зерновых культур является благоприятные условия перезимовки. Потепление климата привело к значительному уменьшению числа зим с опасной для озимых культур минимальной температурой почвы ниже -10°C . Из описания климатических условий степной зоны КБР, приведенной ниже, следует, что наряду с благоприятными условиями зимовки возникают другие риски, связанные с потеплением, а именно – засухи, снижение увлажненности почвы.

Материалы и методы исследований

Климатические условия степной зоны Кабардино-Балкарии характеризуется ярко выраженной изменчивостью погодных условий в течение года. На степной метеостанции Прохладная (Кабардино-Балкарская Республика) среднегодовая температура за 1961–2024 гг. составила $10,7^{\circ}\text{C}$. В период 1961–2024 гг. происходил рост среднегодовых температур со скоростью $0,37^{\circ}\text{C}/10$ лет и высоким вкладом тренда в объясненную дисперсию $D = 46\%$ как результат роста всех сезонных средних температур: в летний сезон на $0,48^{\circ}\text{C}/10$ лет ($D = 50\%$), в зимний сезон на $0,44^{\circ}\text{C}/10$ лет ($D = 17\%$) и в весенний сезон на $0,31^{\circ}\text{C}/10$ лет ($D = 23\%$). Наиболее высокая скорость роста имела место у летних ($0,51^{\circ}\text{C}/10$ лет, $D = 22\%$) и осенних ($0,53^{\circ}\text{C}/10$ лет, $D = 15\%$) абсолютных максимумов температур. Скорость роста годовых абсолютных минимумов температур составила $0,95^{\circ}\text{C}/10$ лет ($D = 13\%$), зимних, весенних, летних и осенних температур, соответственно, $0,95^{\circ}\text{C}/10$ лет, $1,0^{\circ}\text{C}/10$ лет, $0,46^{\circ}\text{C}/10$ лет и $0,21^{\circ}\text{C}/10$ лет. Как видно, наибольший рост на-

блюдается для весенних минимумов температур ($1,0^{\circ}\text{C}/10$ лет [$D = 17\%$]), последствием чего явилось уменьшение весенних заморозков. Годовая сумма осадков на метеостанции Прохладная составила 483,2 мм, в период с 1961 по 2024 г. имела место незначительная положительная тенденция годовых и сезонных сумм осадков, за исключением летнего сезона (уменьшение на 5,2 мм/10 лет) и весеннего сезона с 1976 года (уменьшение на 0,18 мм/10 лет). При этом росли суточные максимумы летних осадков на 2,5 мм/10 лет на статистически значимом уровне ($D = 9\%$), что характеризует увеличение длительности периодов без дождя и усиление ливневых осадков.

Весна – это период, когда растения снова начинают расти после зимнего сезона, и время начала вегетации, которое зависит в основном от температурных условий и влагосодержания почвы (агроклиматические факторы). В начале вегетационного периода агроклиматические условия играют ключевую роль в развитии растений. Необходима достаточная влагообеспеченность почвы для каждого весеннего месяца и затем в летний сезон. Также высокую урожайность обеспечивают благоприятные температурные условия в летний сезон и их соотношение с эффективной температурой (наиболее благоприятная температура для созревания культур).

Выбор модели урожайности зависит от взаимодействия различных факторов окружающей среды и специфических характеристик каждого вида растения и всегда есть возможность учесть другие важные факторы, влияющих на урожайность.

В работе [18] была предложена 1-я мультипликативная модель, в которой предполагалось, что зависимость урожайности озимых сельскохозяйственных культур от агрометеорологических факторов (всесезонные осадки p_i и температуры T_i , эффективная температура T_e) описывается выражением вида:

$$y = Y_0 T_B^{a_1} T_L^{a_2} e^{-\frac{T_L}{T_3}} T_0^{a_3} T_3^{a_4} (p_0 + p_3)^{b_1} (p_3 + p_B)^{b_2} (p_B + p_L)^{b_3}. \quad (1)$$

В данной работе предложен новый подход к улучшению информационного обеспечения задачи снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с нехваткой влаги в почве в земледельческой зоне КБР. Он заключается в использовании значений коэффи-

циентов влагообеспеченности почвы [12], рассчитанных по данным среднемесячных сумм осадков и среднемесячной температуры за 1961–2024 гг. на м/станции Прохладная:

$$K = \Sigma R / 0,1 * \Sigma t \quad (2)$$

где ΣR – сумма осадков в марте, апреле, мае и в летнем сезоне, мм;

Σt – сумма температур в эти же периоды, °С.

При $K < 1,0$ для почвы определяется дефицит увлажнения с различной степенью интенсивности.

Результаты исследований и их обсуждение

По результатам анализа долговременного изменения коэффициента увлажнения почвы K получено, что за последние 60 лет степная зона КБР по состоянию влагообеспеченности остается слабозасушливым районом ($K = 0,90$). За исследованный период имело место уменьшение коэффициента K (степной район, метеостанция Прохладная), что демонстрирует уменьшение влагообеспеченности, близкое к статистически значимому на 5 %-ном уровне. Такие быстрые темпы уменьшения K на м/станции Прохладная позволяет сделать вывод, что степная зона региона скоро полностью окажется в зоне средней и сильной засухи.

Таким образом, климатические изменения в степной зоне Кабардино-Балкарии проявляются в возрастании продолжительности и интенсивности жаркой погоды. Происходит небольшое уменьшение осадков летом при одновременном увеличении интенсивности ливневых осадков, возрастает засушливость в летний период.

С учетом современных климатических изменений в степной зоне КБР, была предложена новая мультипликативная модель озимых культур:

$$Y_{оз} = Y_0 e^{-a_1 \frac{|T_л - T_э|}{T_э}} T_л^{a_2} P_{MT}^{b_1} P_{АП}^{b_2} P_M^{b_3} P_л^{b_4}, \quad (3)$$

где Y_0 – параметр, имеющий размерность урожайности;
 $T_{\text{л}}$ – средние температуры воздуха в летние сезоны;
 T_3 – оптимальная (эффективная) для культуры летняя температура,
 $T_3 = 25^\circ\text{C}$; $P_{\text{мт}}$, $P_{\text{ап}}$, $P_{\text{м}}$ и $P_{\text{л}}$ – коэффициенты влагообеспеченности почвы в марте, апреле, мае и в летние сезоны.

Прологарифмировав выражение (3), получим:

$$\ln Y_{\text{оз}} = \ln Y_0 - a_1 \frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{\text{л}} + b_1 \ln P_{\text{мт}} + b_2 \ln P_{\text{ап}} + b_3 \ln P_{\text{м}} + b_4 \ln P_{\text{л}}. \quad (4)$$

Для использования метода наименьших квадратов (МНК), т. е. для построения модели по формуле (4), длина временных рядов значений фактической урожайности $Y_{\text{оз}}$ должна совпадать по длине со всеми остальными параметрами.

Значения $Y_{\text{оз}}^i$ известны в m точках ($Y_{\text{оз}}^i = Y_{\text{оз}}^1, Y_{\text{оз}}^2, \dots, Y_{\text{оз}}^m$ – фактические урожайности в 1991–2024 гг., $i = \overline{1, m} - 34$). Значения остальных параметров также известны в n -точках с 1991 по 2024 г. ($P_{\text{л}}^j, P_{\text{л}}^j, P_{\text{мт}}^j, P_{\text{ап}}^j, P_{\text{м}}^j; j = \overline{1, n} - 34$). Имеем, что длина ряда $Y_{\text{оз}}^i$ совпадает с длиной рядов $P_{\text{л}}^j; P_{\text{л}}^j, P_{\text{мт}}^j, P_{\text{ап}}^j, P_{\text{м}}^j$ ($i = j = m = n = 34$).

Получим фактическое уравнение расчета урожайности озимой пшеницы:

$$\ln Y_{\text{оз}}^i = \ln Y_0^i - a_1 \frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{\text{л}}^i + b_1 \ln P_{\text{мт}}^i + b_2 \ln P_{\text{ап}}^i + b_3 \ln P_{\text{м}}^i + b_4 \ln P_{\text{л}}^i \quad (5)$$

Определим ошибку Δ как разницу между моделью (правая часть выражения (5)) и фактическими значениями $Y_{\text{оз}}^i$ (левая часть), тогда квадрат ошибки равен:

$$\Delta^2 = [\text{модель} - \ln Y_{\text{оз}}^i]^2 \quad (6)$$

Обозначив $\ln Y_0 = a_0$, получим:

$$\Delta^2 = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{л}^i + b_1 \ln P_{MT}^i + b_2 \ln P_{ан}^i + b_3 \ln P_{M}^i + b_4 \ln P_{л}^i - \ln Y_{03}^i \right], \quad (7)$$

где $a_0, a_1, a_2, b_1, b_2, b_3, b_4$, – коэффициенты уравнения, подлежащие оцениванию с помощью метода наименьших квадратов, а именно минимизации суммы квадратов ошибки ($\Delta^2 \rightarrow \min$).

Минимум квадрата ошибки Δ^2 достигается, когда частные производные по коэффициентам $a_{0,1,2}$ и $b_{1,2,3,4}$ равны нулю.

Продифференцируем уравнение (7) по параметрам $a_{0,1,2}$ и $b_{1,2,3,4}$ и приравняем к нулю производные:

$$\frac{1}{2} \frac{\partial(\Delta^2)}{\partial a_0} = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{л}^i - \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + b_1 \ln P_{MT}^i + b_2 \ln P_{ан}^i + b_3 \ln P_{M}^i + b_4 \ln P_{л}^i - \ln Y_{03}^i \right] = 0 \quad (8a)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial(\Delta^2)}{\partial a_1} = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{л}^i - \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + b_1 \ln P_{MT}^i + b_2 \ln P_{ан}^i + b_3 \ln P_{M}^i + b_4 \ln P_{л}^i - \ln Y_{03}^i \right] \cdot \ln \left(-\frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} \right) = 0 \quad (8б)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \Delta^2}{\partial a_2} = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{л}^i + b_1 \ln P_{MT}^i + b_2 \ln P_{ан}^i + b_3 \ln P_{M}^i + b_4 \ln P_{л}^i - \ln Y_{03}^i \right] \cdot \ln T_{л}^i = 0 \quad (8в)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \Delta^2}{\partial b_1} = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{л}^i + b_1 \ln P_{MT}^i + b_2 \ln P_{ан}^i + b_3 \ln P_{M}^i + b_4 \ln P_{л}^i - \ln Y_{03}^i \right] \cdot \ln P_{MT}^i = 0 \quad (8г)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \Delta^2}{\partial b_2} = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{л}^i + b_1 \ln P_{MT}^i + b_2 \ln P_{ан}^i + b_3 \ln P_{M}^i + b_4 \ln P_{л}^i - \ln Y_{03}^i \right] \cdot \ln P_{ан}^i = 0 \quad (8д)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \Delta^2}{\partial b_3} = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{л}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{л}^i + b_1 \ln P_{MT}^i + b_2 \ln P_{ан}^i + b_3 \ln P_{M}^i + b_4 \ln P_{л}^i - \ln Y_{03}^i \right] \cdot \ln P_{M}^i = 0 \quad (8е)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\partial \Delta^2}{\partial b_4} = \sum_{i=1}^n \left[a_0 - a_1 \frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} + a_2 \ln T_{\text{л}}^i + b_1 \ln P_{\text{МТ}}^i + b_2 \ln P_{\text{ап}}^i + \right. \\ \left. + b_3 \ln P_{\text{М}}^i + b_4 \ln P_{\text{л}}^i - \ln Y_{03}^i \right] \cdot \ln P_{\text{л}}^i = 0 \quad (8\text{ж})$$

Введем обозначения $a_0 = x_1$, $a_1 = x_2$, $a_2 = x_3$ и $b_1 = x_4$, $b_2 = x_5$, $b_3 = x_6$, $b_4 = x_7$ и запишем уравнения относительно $x_1 - x_7$:

$$x_1 \sum_{i=1}^n 1 + x_2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) + x_3 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i + x_4 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{МТ}}^i + \\ + x_5 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i + x_6 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i + x_7 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \quad (9\text{а})$$

($n = 34$, все значения переменных T , P , Y с 1991 по 2024 гг.)

Также для остальных уравнений:

$$x_1 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) + x_2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) + \\ + x_3 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) + x_4 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{МТ}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) + \\ + x_5 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) + x_6 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) + \\ + x_7 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) \quad (9\text{б})$$

$$x_1 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i + x_2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) \ln T_{\text{л}}^i + x_3 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln T_{\text{л}}^i + \\ + x_4 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{МТ}}^i \ln T_{\text{л}}^i + x_5 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln T_{\text{л}}^i + x_6 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i \ln T_{\text{л}}^i + \\ + x_7 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln T_{\text{л}}^i = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln T_{\text{л}}^i \quad (9\text{в})$$

$$x_1 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{МТ}}^i + x_2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3} \right) \ln P_{\text{МТ}}^i + \\ + x_3 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{МТ}}^i + x_4 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{МТ}}^i \ln P_{\text{МТ}}^i + x_5 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{МТ}}^i + \\ + x_6 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{М}}^i \ln P_{\text{МТ}}^i + x_7 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{МТ}}^i = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{МТ}}^i \quad (9\text{г})$$

$$\begin{aligned}
& x_1 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i + x_2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3}\right) \ln P_{\text{ап}}^i + x_3 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{ап}}^i + \\
& + x_4 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{мт}}^i \ln P_{\text{ап}}^i + x_5 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{ап}}^i + x_6 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i \ln P_{\text{ап}}^i + \quad (9\text{д}) \\
& + x_7 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{ап}}^i = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{ап}}^i
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& x_1 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i + x_2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3}\right) \ln P_{\text{м}}^i + x_3 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{м}}^i + \\
& + x_4 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{мт}}^i \ln P_{\text{м}}^i + x_5 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{м}}^i + x_6 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i \ln P_{\text{м}}^i + \quad (9\text{е}) \\
& + x_7 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{м}}^i = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{м}}^i
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& x_1 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i + x_2 \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3}\right) \ln P_{\text{л}}^i + x_3 \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{л}}^i + \\
& + x_4 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{мт}}^i \ln P_{\text{л}}^i + x_5 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{л}}^i + x_6 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i \ln P_{\text{л}}^i + \quad (9\text{ж}) \\
& + x_7 \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{л}}^i = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{л}}^i
\end{aligned}$$

С учетом общего вида системы уравнений:

$$\begin{aligned}
A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + A_{13}x_3 + A_{14}x_4 + A_{15}x_5 + A_{16}x_6 + A_{17}x_7 &= B_1 \\
A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + A_{23}x_3 + A_{24}x_4 + A_{25}x_5 + A_{26}x_6 + A_{27}x_7 &= B_2 \\
A_{31}x_1 + A_{32}x_2 + A_{33}x_3 + A_{34}x_4 + A_{35}x_5 + A_{36}x_6 + A_{37}x_7 &= B_3 \\
A_{41}x_1 + A_{42}x_2 + A_{43}x_3 + A_{44}x_4 + A_{45}x_5 + A_{46}x_6 + A_{47}x_7 &= B_4 \\
A_{51}x_1 + A_{52}x_2 + A_{53}x_3 + A_{54}x_4 + A_{55}x_5 + A_{56}x_6 + A_{57}x_7 &= B_5 \\
A_{61}x_1 + A_{62}x_2 + A_{63}x_3 + A_{64}x_4 + A_{65}x_5 + A_{66}x_6 + A_{67}x_7 &= B_6 \\
A_{71}x_1 + A_{72}x_2 + A_{73}x_3 + A_{74}x_4 + A_{75}x_5 + A_{76}x_6 + A_{77}x_7 &= B_7
\end{aligned}$$

Получим выражения для коэффициентов $A_{11}-A_{77}$ при x , а также B_1-B_7 :

$$\begin{aligned}
1. \quad A_{11} &= \sum_{i=1}^n 1 = n = 34; & A_{12} &= \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_3|}{T_3}\right); \\
A_{13} &= \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i; & A_{14} &= \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{мт}}^i; & A_{15} &= \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \\
A_{16} &= \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i; & A_{17} &= \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i; & B_1 &= \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i
\end{aligned}$$

2. $A_{21} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$; $A_{22} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right) \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$;
 $A_{23} = \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$; $A_{24} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{MT}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$;
 $A_{25} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$; $A_{26} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$;
 $A_{27} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$; $B_2 = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right)$
3. $A_{31} = \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i$; $A_{32} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right) \ln T_{\text{л}}^i$;
 $A_{33} = \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln T_{\text{л}}^i$; $A_{34} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{MT}}^i \ln T_{\text{л}}^i$; $A_{35} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln T_{\text{л}}^i$;
 $A_{36} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i \ln T_{\text{л}}^i$; $A_{37} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln T_{\text{л}}^i$; $B_3 = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln T_{\text{л}}^i$
4. $A_{41} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{MT}}^i$; $A_{42} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right) \ln P_{\text{MT}}^i$; $A_{43} = \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{MT}}^i$;
 $A_{44} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{MT}}^i \ln P_{\text{MT}}^i$; $A_{45} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{MT}}^i$; $A_{46} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i \ln P_{\text{MT}}^i$;
 $A_{47} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{MT}}^i$; $B_4 = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{MT}}^i$
5. $A_{51} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i$; $A_{52} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right) \ln P_{\text{ап}}^i$; $A_{53} = \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{ап}}^i$;
 $A_{54} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{MT}}^i \ln P_{\text{ап}}^i$; $A_{55} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{ап}}^i$; $A_{56} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i \ln P_{\text{ап}}^i$;
 $A_{57} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{ап}}^i$; $B_5 = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{ап}}^i$
6. $A_{61} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i$; $A_{62} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right) \ln P_{\text{м}}^i$; $A_{63} = \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{м}}^i$;
 $A_{64} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{MT}}^i \ln P_{\text{м}}^i$; $A_{65} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{м}}^i$; $A_{66} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{м}}^i$;
 $A_{67} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{м}}^i$; $B_6 = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{м}}^i$
7. $A_{71} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i$; $A_{72} = \sum_{i=1}^n \left(-\frac{|T_{\text{л}}^i - T_{\text{э}}|}{T_{\text{э}}}\right) \ln P_{\text{л}}^i$; $A_{73} = \sum_{i=1}^n \ln T_{\text{л}}^i \ln P_{\text{л}}^i$;
 $A_{74} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{MT}}^i \ln P_{\text{л}}^i$; $A_{75} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{ап}}^i \ln P_{\text{л}}^i$; $A_{76} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{м}}^i \ln P_{\text{л}}^i$;
 $A_{77} = \sum_{i=1}^n \ln P_{\text{л}}^i \ln P_{\text{л}}^i$; $B_7 = \sum_{i=1}^n \ln Y_{03}^i \ln P_{\text{л}}^i$

Для определения коэффициентов $A_{11}-A_{77}$ и B_1-B_7 используем данные рядов летних температур $T_{\text{л}}^i$ с 1961 по 2024 г. Также используем результаты расчетов коэффициентов увлажнения P^i в летний период и месяцы март, апрель и май.

При решении задачи нахождения параметров x_1-x_7 в электронной таблице Excel удобнее применить матричный подход. Последовательность действий представлена на рисунке 1: формируется матрица A с элементами из коэффициентов ($A_{11}:A_{77}$) и вектор ($B_1:B_7$) из свободных членов, определяется транспонированная матрица A^T , находятся произведения $A^T B$ и $A^T A$, вычисляется обратная матрица $(A^T A)^{-1}$. Для вычисления итогового результата-решения системы уравнений перемножаются матрицы $(A^T A)^{-1} A^T A$. В ячейках $B46$ и $B52$ имеем результат решения системы – параметры $x_1 - x_7$.

Подставив полученные результаты решения системы x_1-x_7 (соответствующие параметрам a_0-a_2 и b_1-b_4) в формулу (3), получим рабочую формулу модели урожайности озимой пшеницы:

$$Y_{оз} = 35,16e^{-11,11 \frac{|T_{л}-T_{э}|}{T_{э}}} T_{л}^{0,05} P_{MT}^{-0,12} P_{ап}^{-0,06} P_{M}^{-0,21} P_{л}^{0,004}, \quad (10)$$

Подставляя в (10) значения летних температур $T_{л}$, коэффициентов увлажнения за март, апрель, май и летний сезон (P_{MT} , $P_{ап}$, P_{M} и $P_{л}$), получим расчетные значения урожайности озимой пшеницы с 1991 по 2024 г.

На рисунке 2 показано соответствие между фактическими и расчетными значениями урожайности озимой пшеницы с учетом климатических условий степной зоны КБР.

Результаты корреляционного анализа между фактическими и расчетными значениями урожайности представлены в таблице 1. Из таблицы видно, что коэффициент корреляции на 1%-ном уровне значимости ($r = 0,54$, $Sig. = 0,001 < p = 0,01$) демонстрирует хоро-

Таблица 1. КОРРЕЛЯЦИЯ ПИРСОНА МЕЖДУ ФАКТИЧЕСКИМИ И МОДЕЛЬНЫМИ УРОЖАЙНОСТЯМИ
Table 1. Pearson correlation between actual and model yields

Корреляция Пирсона, r	$Y_{факт}$	$Y_{модель}$
$Y_{факт}$	1	0,540
$Y_{модель}$	0,540	1
Sig. знч. (2-сторон)	0,001	
N	34	

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

18 матрица A (A11:A77)								Вектор B (B1:B7)	
19	34	-0,215	193,550	27,340	4,960	0,540		-12,430	115,7
20	-0,215	0,002	-1,22	-0,18	-0,049	0,008		0,057	-0,725
21	193,55	-1,220	1101,750	155,610	28,200	3,080		-109,350	658,52
22	27,34	-0,180	155,610	39,190	3,420	-4,200		-9,950	81,84
23	4,96	-0,049	28,202	3,420	13,521	-0,810		0,969	16,13
24	0,54	0,010	163,090	-4,300	-0,810	8,680		1,950	1,564
25	-12,43	0,060	-70,770	-9,950	0,970	-1,660		11,170	-42,35
27 1.Матрица трансп. A _t									
28	34	-0,215	193,55	27,34	4,96	0,54		-12,43	
29	-0,215	0,002	-1,220	-0,180	-0,049	0,010		0,060	
30	193,550	-1,220	1101,750	155,610	28,202	163,090		-70,770	
31	27,340	-0,180	155,610	39,190	3,420	-4,300		-9,950	
32	4,960	-0,049	28,200	3,420	13,521	-0,810		0,970	
33	0,540	0,008	3,080	-4,200	-0,810	8,680		-1,660	
34	-12,430	0,057	-109,350	-9,950	0,969	1,950		11,170	
2.Произведения (A _t на B)		3. Произведение (A _t на A)							
36	134508,667	37	39544,522	-249,346	225186,674	32257,689	5774,833	520,968	-21992,342
38	-648,118	38	-249,346	1,573	-1417,758	-203,584	-36,699	-3,091	138,513
39	765917,332	39	225186,674	-1417,758	1307932,719	182932,875	32742,173	4354,591	-124875,726
40	109704,697	40	32257,689	-203,584	182932,875	26627,025	4697,920	305,866	-17861,953
41	19634,012	41	5774,833	-36,699	32742,173	4697,920	1015,955	55,577	-3156,997
42	1775,797	42	520,968	-3,091	4354,591	305,866	55,577	106,172	-304,121
43	-74815,532	43	-21992,342	138,513	-124875,726	-17861,953	-3156,997	-304,121	12340,444
4. Обратная matr. (A _t на A) ⁻¹									
	133,1	22189,0	10,3	-59,3	9,7	-255,4	2,3		
	22189,0	3699444,5	1709,8	-9889,1	1623,5	-42598,6	373,3		
	10,3	1709,8	0,8	-4,6	0,7	-19,7	0,2		
	-59,3	-9889,1	-4,6	26,5	-4,3	114,1	-1,0		
	9,7	1623,5	0,7	-4,3	0,7	-18,6	0,2		
	-255,4	-42598,6	-19,7	114,1	-18,6	491,4	-4,2		
	2,3	373,3	0,2	-1,0	0,2	-4,2	0,1		
5.Результат(4.(A _t на A) ⁻¹ умнож. на 2.(A _t на B)									
45									
46	x ₁	3,56	a ₁	Y _{Excel} (3,56)=35,163	35,163				
47	x ₂	11,11	a ₁		11,113				
48	x ₃	0,00	a ₂		0,005				
49	x ₄	-0,12	b ₁		-0,124				
50	x ₅	-0,06	b ₂		-0,064				
51	x ₆	-0,21	b ₃		-0,213				
52	x*	0,00	b ₄		0,004				

Рис. 1.

Скрин-шоты последовательности операций для расчетов параметров $x_1 - x_7$ в Excel.

Fig. 1. Screenshots of the sequence of operations for calculating parameters $x_1 - x_7$ in Excel.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

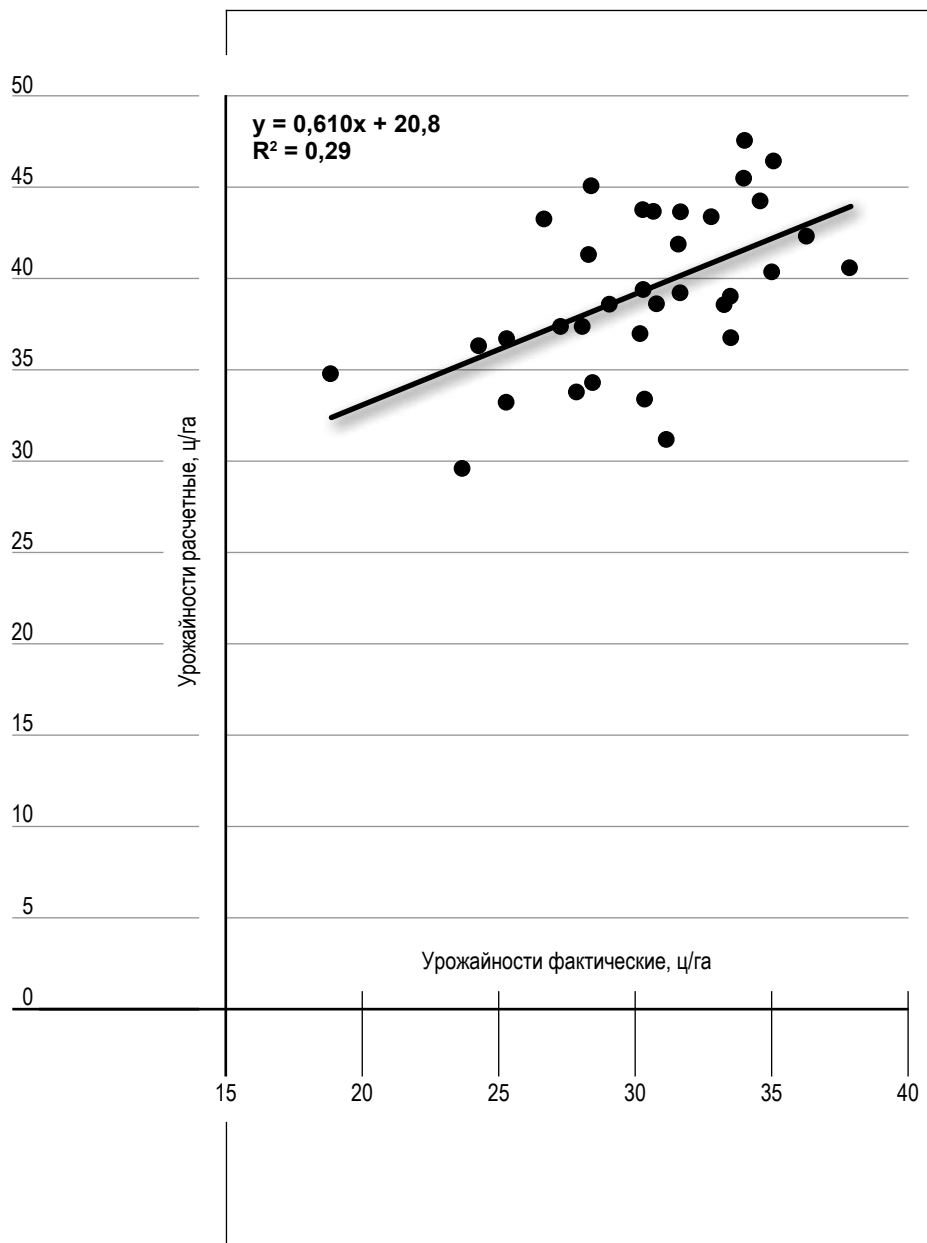


Рис. 2.

Связь между фактическими и расчетными значениями урожайности озимой пшеницы в степной зоне КБР с линейным трендом (парная корреляция $r = 0,54$).

Fig. 2. Correlation between actual and estimated values of winter wheat yield in the steppe zone of the KBR with a linear trend (pair correlation $r = 0.54$).

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

шее соответствие между фактическими значениями урожайности и модельными, рассчитанными по формуле (10).

Предложенная модель урожайности может быть использована для оценки изменений урожайности озимых культур в зависимости от изменения температуры, осадков, увлажнения почвы в летний и весенний сезоны на период упреждения.

Заключение

Анализ климатических условий в степной зоне КБР за последние 60 лет показал рост термических ресурсов во все сезоны и значимые тенденции к иссушению в летние сезоны. Уменьшение гидротермического коэффициента K в степном районе демонстрирует уменьшение влагообеспеченности, близкое к статистически значимому на 5 %-ном уровне.

Такие тенденции имеют как положительные, так и отрицательные последствия. Так, увеличение продолжительности безморозного периода является положительным фактором, но сокращение периода налива зерна и более раннее созревание при повышении температуры часто ведёт к снижению урожая. Рост температуры воздуха в летние сезоны в сочетании со снижением количества летних осадков либо с незначительным изменением осадков в будущем ведет к повышению аридизации территорий и может иметь отрицательные последствия для сельского хозяйства региона, особенно для степной зоны КБР.

Результат исследования, полученный в виде мультипликативной модели урожайности озимой пшеницы в зависимости от климатообразующих факторов, предоставляет новые возможности для прогнозирования продуктивности климатозависимой сельскохозяйственной культуры от будущих изменений климатических параметров и принятия мер по адаптации для минимизации рисков на фоне потепления климата и аридизации территорий на юге европейской части России.

Список источников

1. Переведенцев Ю. П., Шарипова Р. Б., Важнова Н. А. Агроклиматические ресурсы Ульяновской области и их влияние на урожайность зерновых культур // Вестник УдГУ. Сер. Биология. Науки о Земле. 2012. №2. С. 120–126.

2. Золотокрылин А. Н., Черенокова Е. А., Титкова Т. Б., Михайлов А. Ю., Бардин М. Ю., Ширяева А. В., Виноградова В. В. Изменения урожайности зерновых культур Европейской России, вызванные квазидвухлетней цикличностью атмосферных процессов // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2016. №2. С. 90–99. <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-2-90-99>
3. Morgounov A., Sonder K., Abugalieva A., Bhadauria V., Cuthbert R.D., Shamanin V. et al. Effect of climate change on spring wheat yields in North America and Eurasia in 1981–2015 and implications for breeding // PLoS ONE. 2018. №13(10): e0204932. [Electronic resource]. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204932> (accessed: 18.08.2025).
4. Израэль Ю. А., Сиротенко О. Д. Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России // Метеорология и гидрология. 2003. №6. С. 5–17.
5. Павлова В. Н., Карачёноква А. А. Изменение агроклиматических ресурсов зернопроизводящих регионов России и продуктивности зерновых культур в новом климатическом периоде 1991–2020 гг. // Метеорология и гидрология. 2023. №9. С. 29–42.
6. Вышкваркова Е. В., Воскресенская Е. Н. Агроклиматическая оценка территории Крыма и Донбасса (на примере Севастополя и Артемовска) для рационального размещения виноградников в условиях изменений климата // Метеорология и гидрология. 2023. №10. С. 66–76.
7. Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Ташилова А. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В. Формирование плана адаптации регионального аграрного сектора к изменению климата: задачи и методы решения // Метеорология и гидрология. 2023. №10. С. 57–65.
8. Насонов Д. В. Климатические риски и адаптация земледелия // Сельскохозяйственные вести. 2011. №1. С. 36–37.
9. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. Москва, 2025. 135 с.
10. Ашабоков Б. А. и др. Пространственно-временное изменение климата юга европейской территории России, оценка его последствий, методы и модели адаптации АПК. Нальчик: Фрегат, 2020. 476 с.
11. Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Куповых Г. В., Ташилова А. А., Кешева Л. А., Теунова Н. В., Ашабокова М. Б. Ме-

- тод снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с засухами, с учетом вероятности их появления // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2023. №3. С. 45–56. [https://doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-45-56](https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-3-45-56)
12. Селянинов Г. Т. Агроклиматическая карта мира. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 12 с.
 13. Сиротенко О. Д. Имитационная система Климат–Урожай СССР // Метеорология и гидрология. 1991. №4. С. 67–73.
 14. Павлова В. Н., Карачёнова А. А. Изменение агроклиматических ресурсов зернопроизводящих регионов России и продуктивности зерновых культур в новом климатическом периоде 1991–2020 гг. // Метеорология и гидрология. 2023. №9. С. 29–42.
 15. Мурынин А. Б., Бондур В. Г., Игнатъев В. Ю., Гороховский К. Ю. Прогнозирование урожайности на основе многолетних космических наблюдений за динамикой развития вегетации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. №4. С. 245–256.
 16. Маренич Н. Н., Шкурко В. С. Влияние метеорологических факторов на урожайность зерновых культур и возможности прогнозирования урожаев // Вестник Курганской ГСХА. №1. 2014. С. 18–20.
 17. Сиптиц С. О., Романенко И. А., Евдокимова Н. Е. Модельные оценки влияния климата на урожайность зерновых и зернобобовых культур в регионах России // Проблемы прогнозирования. 2021. №2(185). С. 75–86. [https://doi: 10.47711/0868-6351-185-75-86](https://doi.org/10.47711/0868-6351-185-75-86)
 18. Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Ташилова А. А., Кешева Л. А. Об одной модели адаптации АПК к изменению климата. Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата. Материалы Международной научной конференции (Ставрополь, 23-26 сентября 2013 года). Ставрополь, 2013. С. 196–199.

References

1. Perevedentsev YuP, Sharipova RB, Vazhnova NA. Agroclimatic resources of the Ulyanovsk region and their influence on the yield of grain crops. Bulletin of Udmurt State University. Series: Biology. Earth Sciences. 2012;(2):120-126. (In Russ.).

2. Zolotokrylin AN, Cherenokova EA, Titkova TB, Mikhailov AYu, Bardin M Yu, Shiryaeva AV, Vinogradova VV. Changes in the yield of grain crops in European Russia caused by the quasi-biennial cyclicity of atmospheric processes. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series.* 2016;(2):90-99. (In Russ.). <https://doi.org/10.15356/0373-2444-2016-2-90-99>
3. Morgounov A, Sonder K, Abugalieva A, Bhadauria V, Cuthbert RD, Shamanin V. et al. Effect of climate change on spring wheat yields in North America and Eurasia in 1981–2015 and implications for breeding. *PLoS ONE.* 2018;13(10): e0204932. [Electronic resource]. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204932> (Accessed: 18 August 2025).
4. Izrael YuA, Sirotenko OD. Modeling the Impact of Climate Change on Agricultural Productivity in Russia. *Meteorology and Hydrology.* 2003;(6):5-17. (In Russ.).
5. Pavlova VN, Karachenkova AA. Changes in Agroclimatic Resources of Grain-Producing Regions of Russia and Grain Crop Productivity in the New Climatic Period 1991–2020. *Meteorology and Hydrology.* 2023;(9):29-42. (In Russ.).
6. Vyshkvarkova EV, Voskresenskaya EN. Agroclimatic Assessment of the Territory of Crimea and Donbass (using Sevastopol and Artemovsk as an Example) for Rational Vineyard Placement in the Context of Climate Change. *Meteorology and Hydrology.* 2023;(10):66-76. (In Russ.).
7. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Tashilova AA, Kesheva LA, Teunova NV. Formation of a plan for adaptation of the regional agricultural sector to climate change: tasks and methods of solution. *Meteorology and Hydrology.* 2023;(10):57-65. (In Russ.).
8. Nasonov DV. Climate risks and adaptation of agriculture. *Sel'skokhozyaistvennyye Vesti.* 2011;(1):36-37. (In Russ.).
9. Report on the features of the climate in the territory of the Russian Federation for 2024. Moscow, 2025. 135 p. (In Russ.).
10. Ashabokov BA et al. Spatiotemporal climate change in the south of European Russia, assessment of its consequences, methods and models of adaptation of the agro-industrial complex. *Nalchik: OOO Fregat; 2020.* 476 p. (In Russ.).
11. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Kupovykh GV, Tashilova AA, Kesheva LA, Teunova NV, Ashabokova MB. Method for Reducing Drought-Associated Risks in Agriculture, Taking into Account the Probability of Their Occurrence. *News of Higher Education Institutions. North Caucasus Region. Natural Sci-*

- ences. 2023;(3):45-56. (In Russ.). [https://doi: 10.18522/1026-2237-2023-3-45-56](https://doi.org/10.18522/1026-2237-2023-3-45-56)
12. Selyaninov GT. Agroclimatic map of the world. L.: Gidrometeoizdat. 1966. 12 p. (In Russ.).
 13. Sirotenko OD. The Climate-Harvest Simulation System for the USSR. *Meteorology and Hydrology*. 1991;(4):67-73. (In Russ.).
 14. Pavlova VN, Karachenkova AA. Changes in Agroclimatic Resources of Grain-Producing Regions of Russia and Grain Crop Productivity in the New Climatic Period 1991–2020. *Meteorology and Hydrology*. 2023;(9):29-42. (In Russ.).
 15. Murynin AB, Bondur VG, Ignatiev VYu, Gorokhovskiy KYu. Forecasting Crop Yields Based on Long-Term Space Observations of Vegetation Dynamics. *Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space*. 2013;10(4):245-256. (In Russ.).
 16. Marenich NN, Shkurko VS. The influence of meteorological factors on the yield of grain crops and the possibilities of forecasting yields. *Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy*. 2014;(1):18-20. (In Russ.).
 17. Siptits SO, Romanenko IA, Evdokimova NE. Model estimates of the influence of climate on the yield of grain and leguminous crops in the regions of Russia. *Problems of Forecasting*. 2021;2(185):75-86. (In Russ.). [https://doi: 10.47711/0868-6351-185-75-86](https://doi.org/10.47711/0868-6351-185-75-86)
 18. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Tashilova AA, Kesheva LA. On one model of adaptation of the agro-industrial complex to climate change. *Innovative research methods and tools in atmospheric physics, hydrometeorology, ecology, and climate change. Proceedings of the International Scientific Conference, Stavropol, September 23–26, 2013*. Stavropol: Stavropol, 2013. P. 196–199. (In Russ.).

Информация об авторах

Борис Азреталиевич Ашабоков – доктор физико-математических наук, профессор, 1) заведующий отделом физики облаков Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт», 2) 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, ВНС лаборатории микрофизики облаков Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт», Scopus ID: 57191577384, Researcher ID: K-4321-2015

Лара Асировна Кешева – кандидат физико-математических наук, СИС лаборатории атмосферных конвективных явлений Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт», Scopus ID: 57191577471, Researcher ID: K-4261-2015

Наталья Вячеславовна Теунова – кандидат физико-математических наук, СИС лаборатории микрофизики облаков Федерального государственного бюджетного учреждения «Высокогорный геофизический институт», Scopus ID: 57191571952, Researcher ID: K-4312-2015

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

Information about the authors

Boris A. Ashabokov – Dr. Sci. (Physical and Mathematical), professor, 1. Head of the Department of Cloud Physics, Federal State Budgetary Institution “High Mountain Geophysical Institute”, 2. Head of Department at the Institute of Informatics and Regional Management Problems, KBSC RAS Scopus ID: 6505916110, Researcher ID: K-4299-2015

Alla A. Tashilova – Dr. Sci. (Physical and Mathematical), associate professor, Leading Researcher at the Laboratory of Cloud Microphysics of Federal state budgetary institution “High-Mountain Geophysical Institute”, Scopus ID: 57191577384, Researcher ID: K-4321-2015

Lara A. Kesheva – Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Senior Researcher at the Laboratory of Atmospheric Convective Phenomena of the Federal State Budgetary Institution “High Mountain Geophysical Institute”, Scopus ID: 57191577471, Researcher ID: K-4261-2015

Nataliya V. Teunova – Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Senior Researcher at the Laboratory of Cloud Microphysics of the Federal State Budgetary Institution “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 551.509

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.3>

ОЦЕНКА МАКСИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ГРАДА ПО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ АТМОСФЕРЫ МЕТОДАМИ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Лежинка Танашевна Созаева^{1*},
Артур Хасанбиевич Кагермазов²

^{1,2} Высокогорный геофизический институт (д. 2, пр. Ленина, Нальчик, 360030, Российская Федерация)

¹ lj_k_62@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9840-3566>

² ka5408@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8126-6008>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Градобития наносят значительный ущерб экономике, особенно в аграрном секторе. Однако прогнозирование града осуществляется с недостаточной точностью. Затруднения встречает и определение размера града, который напрямую влияет на величину ущерба. Данное исследование направлено на оценку максимального размера града на основе метеорологических параметров атмосферы. Для этого подбирались данные о максимальном размере града, зафиксированные Ставропольской военизированной службой по борьбе с градом, и соответствующие им температура, влажность, направление и скорость ветра на стандартных изобарических уровнях из глобальной модели атмосферы, как замена результатов аэрологического зондирования. Исследование основывалось на методах нейросетевого моделирования, где зависимой переменной является диаметр выпавшего града, а независимыми переменными выступают атмосферные параметры. Среда SPSS позволила автоматически выбрать нейронную модель, состоящую из одного слоя с четырьмя нейронами. По результатам исследования ошибки на обучающей и тестовой выборках оказались одинаковыми, что указывает на адекватность модели. Дополнительные критерии оценки её качества, такие как диаграммы прогнозов и остатков, также подтвердили адекватность моде-

ли. Установлено, что 65 % вариации максимального размера града объясняется разработанной моделью. Ключевыми параметрами атмосферы, влияющими на максимальный размер града, оказались: индекс неустойчивости Джорджа, температура на уровне конвекции, уровень, на котором разница температур в облаке и окружающей среде достигает максимума, а также средний дефицит влажности в слое выше уровня конденсации на высоте 5 км. Было сделано заключение, что предложенная нейросетевая модель оценки размера града может эффективно применяться службами, занимающимися борьбой с градом.

Ключевые слова: прогноз града, максимальный размер града, глобальная модель атмосферы, параметры атмосферы, нейросетевое моделирование

Для цитирования: Созаева Л. Т., Кагермазов А. Х. Оценка максимального размера града по термодинамическим параметрам атмосферы методами нейросетевого моделирования // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 4. С. 69–84. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.3>

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 08.08.2025;
одобрена после рецензирования 28.11.2025;
принята к публикации 15.12.2025.

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

**Estimation of the maximum hail size based
on thermodynamic atmosphere parameters using
neural network modeling methods**

**Lezhinka T. Sozaeva^{1*},
Arthur Kh. Kagermazov²**

^{1,2} Federal state budgetary institution «High-Mountain Geophysical Institute» (2, Lenin Avenue, Nalchik, 360001, Russian Federation)

¹ lj_k_62@rambler.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9840-3566>

² ka5408@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8126-6008>

* Corresponding author

Abstract.

Hailstorms cause significant economic damage, especially in the agricultural sector. However, hail forecast-

ing is performed with insufficient accuracy. Determining hail size, which directly affects the magnitude of losses, is also challenging. This study aims to estimate the maximum hail size based on atmospheric meteorological parameters. To this end, we compiled data on maximum hail size recorded by the Stavropol Militarized Hail Suppression Service, together with the corresponding temperature, humidity, wind direction, and wind speed at standard isobaric levels from a global atmospheric model, used as a substitute for upper-air sounding results. The study was based on neural-network modeling methods, with the diameter of the fallen hail as the dependent variable and atmospheric parameters as the independent variables. The SPSS environment automatically selected a neural model consisting of a single layer with four neurons. According to the results, the errors on the training and test samples were identical, indicating the adequacy of the model. Additional quality assessment criteria, such as prediction and residual plots, also confirmed the adequacy of the model. The key atmospheric parameters influencing the maximum hail size were found to be: the George instability index, the temperature at the convection level, the level at which the temperature difference between the cloud and the surrounding environment reaches its maximum, and the mean moisture deficit in the layer above the condensation level at an altitude of 5 km. It was concluded that the proposed neural-network model for estimating hail size can be effectively applied by services engaged in hail suppression.

Keywords: hail forecast, maximum hail size, global atmospheric model, atmospheric parameters, neural network modeling

For citation: Sozaeva LT, Kagermazov AKh. Estimation of the maximum hail size based on thermodynamic atmosphere parameters using neural network modeling methods. *Science. Innovations. Technologies.* 2025;(4):69-84. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.3>

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

The article was submitted 08.08.2025;
approved after reviewing 28.11.2025;
accepted for publication 15.12.2025.

Введение

Опасные метеорологические явления наносят значительный ущерб экономике стран по всему миру. В 2024 году общий объем убытков от таких событий составил 320 миллиардов долларов, из которых 57 миллиардов пришлись на экономику США. Ущерб от одного случая града в Калгари (Канада) оценивался в 2,8 миллиарда долларов [8]. Известно, что способность града причинять повреждения определяется его кинетической энергией, которая представляет собой работу, выполняемую силой тяжести при столкновении градин с различными поверхностями. Чем выше масса и скорость градин, тем больше их кинетическая энергия и, соответственно, тем сильнее ущерб. Например, в Ставропольском крае СКФО в течение семи лет на площади 126 т. км² было зафиксировано 12 948 градовых конвективных ячеек, из которых в 35 % случае наблюдались градовые осадки размером 0,5 см и более [1]. Эти явления нанесли ущерб сельскохозяйственным культурам, достигая степени повреждения до 100 %. В современных подходах к разработке моделей града отмечается необходимость прогноза не только града, но и его размера [10, 14, 15].

Традиционно для прогноза града используют результаты аэрологического зондирования, однако их недостаточно: запуски зондов редки, не всегда попадают в пик конвективного развития, а сеть точек измерения ограничена. В то же время современные глобальные численные модели атмосферы (GFS, ECMWF и др.) демонстрируют высокую точность представления структуры термодинамических полей атмосферы с горизонтом прогноза до пяти суток [9, 11, 13]. Ранее нами показано, что выходные поля GFS по набору ключевых параметров сопоставимы с данными аэрологического зондирования [3], что сделало возможным прогнозирование града по данным глобальной модели атмосферы [4]. Результаты этих исследований явились обоснованием возможности проведения оценки максимального размера града.

Цель настоящего исследования – оценить максимальный размер града в локальных условиях по данным глобальной модели атмосферы методами нейросетевого моделирования. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- сбор данных наблюдений о датах выпадения и максимальном размере града;
- формирование входных параметров атмосферы из полей GFS с заблаговременностью 24 часа;
- вычисление наиболее информативных признаков зарождения и формирования града;
- построение нейросетевой модели оценки значения максимального размера града;
- оценка значимости и практической применимости полученной модели.

Для разработки нейросетевой модели было привлечено программное обеспечение для статистического анализа SPSS Statistics 27, разработанное компанией IBM [12].

Материалы и методы исследований

Настоящее исследование было проведено с применением данных о максимальном размере града, зафиксированного на поверхности земли военизированными службами, занимающимися активным воздействием на градовые процессы. Эти службы расположены в пределах радиуса, необходимого для репрезентативности данных аэрологического зондирования на метеостанции «Дивное» Ставропольского края. Были собраны сведения о датах выпадения града, а также информация о максимальном размере (диаметр, см) зафиксированного града. К этим датам был сопоставлен набор метеорологических элементов (температура, влажность, направление и скорость ветра) для географических координат исследуемой метеостанции, выбранных из глобальной модели атмосферы. На их основе были вычислены 45 атмосферных параметров, которые наиболее часто используются в существующих методах прогнозирования конвекционных процессов и связанных с ними опасных метеорологических явлений.

Такое большое количество факторов усложняет процесс вычисления прогноза, что обуславливает необходимость их сокращения путем выделения наиболее важных. Отбор осуществлялся с применением бисериального коэффициента корреляции. В резуль-

тате количество атмосферных параметров было уменьшено до десяти наиболее значимых [2]:

- максимальная разность температур в облаке и окружающем воздухе, *DTM*;
- уровень, на котором разность температур в облаке и окружающем воздухе максимальна, *HM*;
- вертикальный градиент температуры в слое выше уровня конденсации на 4–4,5 км, *DTK*;
- суммарная удельная влажность в слое Земля – 500 гПа, *SOZ5*;
- средний дефицит влажности в слое выше уровня конденсации на 5 км, *TDSK5*;
- уровень конвекции, *PH1*;
- температура на уровне конвекции, *TH1*;
- индекс неустойчивости Джорджа, *DJ*;
- индекс интегральной суммы Миллера, *TTMI*;
- энергетическая характеристика подоблачного слоя, *DSS*.

В итоге, для каждой рассматриваемой даты были рассчитаны вышеуказанные информативные параметры атмосферы, которые определяют температурные и влажностные свойства атмосферы. На размер града действительно оказывают влияние количество влаги и значение температуры на разных высотах. Восходящие потоки в конвективных облаках поднимают влажный воздух на более высокие уровни, где водяной пар конденсируется, образуя капли. Низкие температуры на разных высотах в облаке способствуют замерзанию капель, образованию и росту градин. Мощные электрические процессы способствуют образованию более крупных градин.

Для прогнозирования размера града по параметрам атмосферы предлагается использовать математический аппарат нейронных сетей [5, 6, 7]. На вход нейросети поступает набор параметров, каждому из которых случайным образом присваиваются веса. Внутри нейросети находится сумматор, который умножает каждый входной параметр на соответствующий вес и формирует

итоговую сумму произведений. Полученное значение передается в функцию активации, которая отвечает за определение выходного сигнала нейрона. В качестве функции активации могут использоваться сигмоидальная функция или гиперболический тангенс, которые вводят нелинейность в модель, позволяя нейронным сетям обучаться сложным закономерностям, недоступным для линейных моделей. Результат работы функции активации выводится на выход нейрона, после чего он сравнивается с правильным ответом. На этом этапе возникает задача нахождения минимума функции ошибки. Для решения этой задачи обычно применяется алгоритм обратного распространения ошибки (backpropagation). Этот алгоритм позволяет эффективно вычислять градиенты функции ошибки по отношению ко всем весам в сети, используя метод градиентного спуска. В процессе обучения нейронной сети веса обновляются итеративно, что позволяет модели постепенно улучшать свои прогнозы. Обучение продолжается до тех пор, пока ошибка не станет достаточно малой или не будет достигнуто максимальное количество итераций.

Результаты исследований и их обсуждение

Для оценки максимального размера града были отобраны даты с фактом выпадения града в сезоны 2005–2019 гг. По данным глобальной модели атмосферы для этих дат были рассчитаны наиболее информативные параметры, ответственные за конвективные явления.

В SPSS в основном меню «Анализ» выбрали «Нейронные сети» → «Многослойный персептрон». В окно «Зависимые переменные» поместили значения максимального размера града, в «Ковариаты» – параметры атмосферы (независимые переменные). Фрагмент исходных данных приведены в таблице 1.

Архитектура нейросетевой модели была разработана в режиме автоматического подбора, при этом использовалась функция активации «Гиперболический тангенс». С помощью градиентного спуска оптимизировали ошибки нейросетевой модели. Исходный набор данных был разделен на обучающую и тестовую выборки в соотношении 8 : 2.

Таблица 1. ФРАГМЕНТ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ЗНАЧЕНИЙ МАКСИМАЛЬНОГО РАЗМЕРА ГРАДА И СООТВЕТСТВУЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ
Table 1. Fragment of the initial data values of the maximum hail size and the atmosphere parameters respectively

DTM	HM	DTK	SQZ5	TDSR5	PH1	TH1	DJ	TTMI	DSS	D
5,21	6440,52	16,98	21,50	5,08	9748,93	225,67	307,19	56,99	-156,80	3,00
6,80	7439,24	16,16	30,71	3,54	11282,62	222,95	314,50	56,27	-154,69	3,00
8,47	7775,68	14,82	41,44	9,15	12570,54	228,89	312,58	52,09	-123,86	3,00
4,28	7717,01	21,45	26,97	9,62	10345,94	235,46	308,19	51,99	-460,06	,50
5,23	5913,54	15,09	35,63	3,89	10333,26	238,82	311,06	50,72	-252,48	1,00
4,20	4702,85	14,19	22,03	3,79	9410,65	226,36	308,30	55,52	-86,37	2,00
5,63	5371,11	14,97	22,18	4,31	10046,64	225,99	305,43	55,78	-217,19	1,50
6,50	6845,98	14,68	30,13	2,86	11225,09	222,64	311,93	54,81	-121,29	3,00
4,44	5938,52	12,91	34,67	6,20	8486,14	251,36	310,52	52,49	-87,20	1,50
5,22	5829,97	14,52	26,45	4,08	9604,58	232,09	309,10	54,18	-83,80	2,00
6,71	8232,08	17,09	31,53	6,95	10536,67	234,44	308,13	51,42	-127,38	2,00
6,10	5859,41	14,22	28,54	3,17	10136,71	229,45	310,10	54,88	-57,25	2,50
8,33	7677,86	16,32	29,35	6,93	10579,94	230,49	309,73	56,34	-139,56	2,50
6,67	6820,70	16,11	33,65	10,31	11233,34	233,69	309,40	55,77	-267,47	1,00
6,18	7350,68	16,12	28,93	4,93	9869,16	232,48	311,83	54,74	-62,39	2,00
14,56	9945,71	14,22	35,23	10,73	12838,64	224,04	312,18	57,39	-197,09	3,00
5,49	6501,54	16,33	26,96	3,36	10135,61	229,75	309,65	54,83	-194,49	1,00
4,63	7440,88	14,31	30,95	8,09	10262,29	235,76	305,94	48,23	-187,86	2,00
3,47	3656,55	14,18	18,99	4,12	7708,14	237,89	306,23	55,95	-96,27	1,00
8,32	7061,34	14,49	34,09	6,80	11064,85	230,24	315,44	56,41	-103,30	3,00
6,19	6975,46	14,10	27,48	5,50	10623,54	226,81	305,43	52,00	-113,66	,50
3,67	6670,80	16,49	24,51	7,56	9648,75	233,47	303,01	51,04	-185,16	1,50

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

В режиме автоматического подбора была выбрана нейросетевая модель с одним слоем и четырьмя нейронами. Основными параметрами нейронной сети являются ошибка обучения и ошибка на тестовой выборке. Согласно сводке модели, относительные ошибки для обеих выборок составили 0,35, что показывает адекватность разработанной модели (табл. 2).

Таблица 2. СВОДКА МОДЕЛИ
Table 2. Model summary

Обучающее	Ошибка: сумма квадратов	1,650
	Относительная ошибка	0,353
	Используемое правило остановки	100 последовательных шагов без уменьшения погрешности
	Время обучения	0:00:00,02
Тестовое	Ошибка: сумма квадратов	0,375
	Относительная ошибка	0,354

Вычисление ошибок основано на проверяемой выборке

Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

Качество нейросетевой модели дополнительно оценивается по диаграмме прогнозов и остатков. На диаграмме прогнозов, отражающей соотношение между фактическими и предсказанными значениями, точки располагаются близко к диагонали с коэффициентом детерминации равным $R^2 = 0,65$, что указывает на умеренное соответствие между прогнозами и реальными данными (рис. 1). Данный параметр демонстрирует, что 65 % вариации зависимой переменной объясняется разработанной моделью. Остатки распределены случайным образом вокруг нуля, что также подтверждает адекватность модели (рис. 2).

В таблице 3 представлены параметры атмосферы, ранжированные по значимости их влияния на максимальный размер града. К числу наиболее значимых показателей относятся:

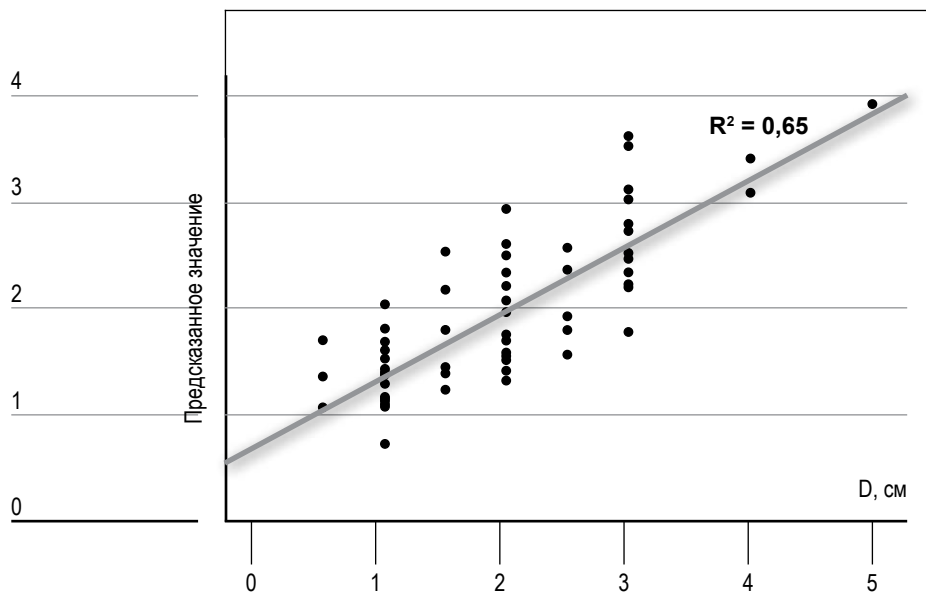


Рис. 1.

Диаграмма прогнозов.

Fig. 1. Diagram of forecasts.

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

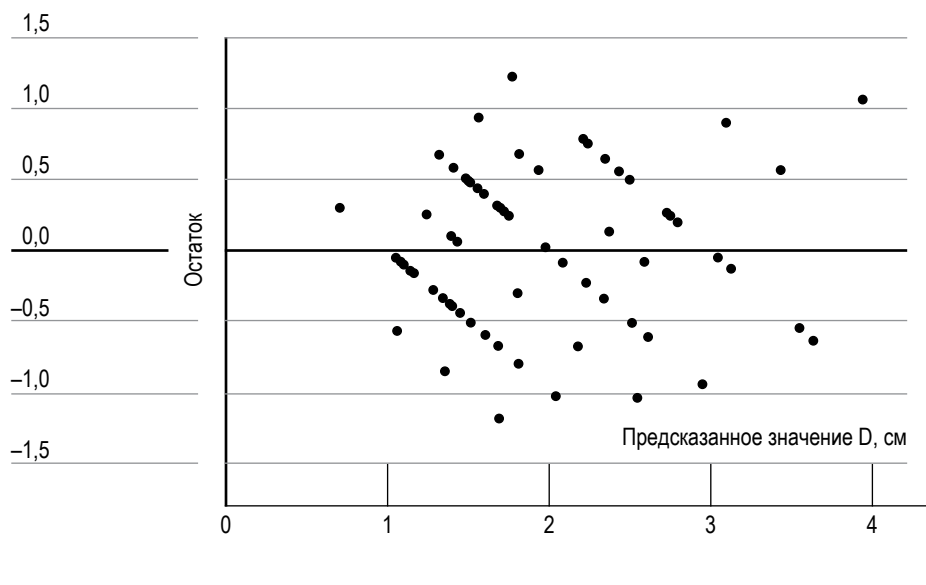


Рис. 2.

Диаграмма остатков.

Fig. 2. Diagram of residuals .

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

- уровень, на котором разность температур в облаке и окружающем воздухе максимальна (97,6 %);
- средний дефицит влажности в слое выше уровня конденсации на 5 км (92,5 %);
- температура на уровне конвекции (94,5 %);
- индекс неустойчивости Джорджа (100 %).

Таблица 3. ЗНАЧИМОСТЬ (ВАЖНОСТЬ) ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРЫ, ВЛИЯЮЩИХ НА ОБРАЗОВАНИЕ ГРАДА, %
Table 3. Importance of atmosphere parameters influencing on the formation of hail, %

Независимые переменные	Важность	Нормализованная важность
DTM	0,079	55,0%
HM	0,140	97,6%
DTK	0,080	55,9%
SQZ5	0,062	43,2%
TDSR5	0,133	92,5%
PH1	0,051	35,6%
TH1	0,135	94,5%
DJ	0,143	100,0%
TTMI	0,097	67,6%
DSS	0,080	56,1%

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

На значение максимального размера града оказывает наиболее значимое влияние индекс неустойчивости Джорджа, отражающий количество энергии в атмосфере, способствующий интенсивной конвекции и образованию градовых облаков. Остальные значимые параметры определяют режимы влажности и температуры в зоне формирования града.

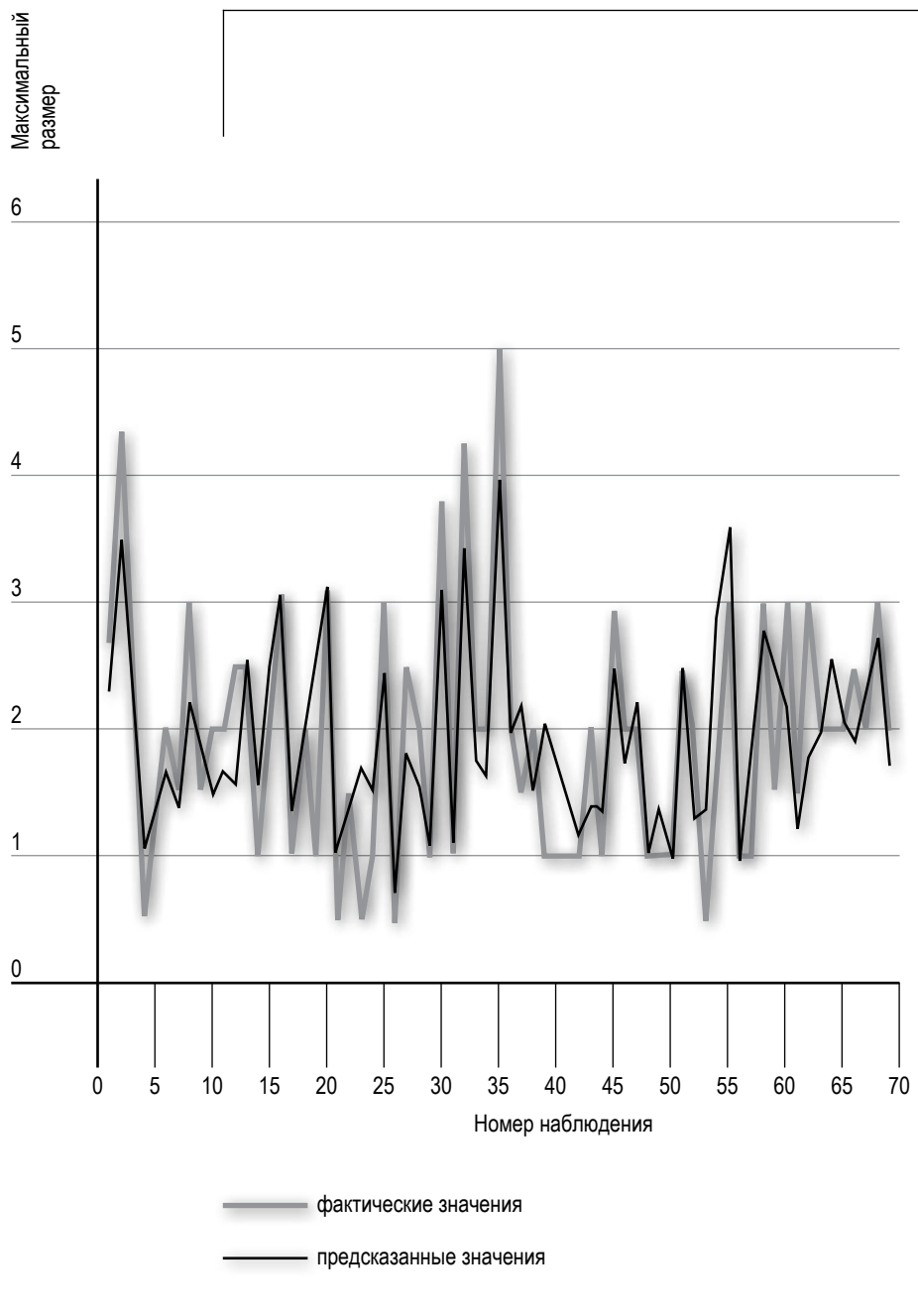


Рис. 3.

Значения максимального размера града из наблюдений и предсказанные по модели.

Fig. 3. Maximum hail sizes from observations and predicted by the model

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

Также был построен график, на котором отображены некоторые фрагменты фактических значений максимальной отражаемости и их предсказанные значения, полученные с помощью нейросетевой модели (рис. 3).

Визуальный анализ адекватности прогноза по сравнению с фактическими данными показал положительные результаты: в целом прогноз соответствует реальным наблюдениям и отражает выявленные тенденции с достаточной точностью.

Заключение

Критерии оценки качества разработанной нейросетевой модели соответствуют требованиям, основанным на анализе ошибок обучения и оценке диаграмм прогнозов и ошибок. Выявлены ключевые параметры атмосферы, влияющие на размер града. Визуализация предсказанных значений в сравнении с наблюдаемыми данными продемонстрировала высокую степень согласия. Будущие исследования будут направлены на оптимизацию архитектуры сети и повышение предсказательной точности за счет расширения объема данных.

Список источников

1. Абшаев А. М. [и др.] Руководство по организации и проведению противоградовых работ / А. М. Абшаев, М.Т. Абшаев, М.В. Барекова, А.М. Малкарова. Нальчик: Печатный двор, 2014. 508 с.
2. Кагермазов А. Х. Цифровая атмосфера. Современные методы и методология исследования опасных метеорологических процессов и явлений. Нальчик: Печатный двор, 2015. 215 с.
3. Кагермазов А. Х., Созаева Л. Т. Валидация выходных данных глобальной модели атмосферы по данным аэрологического зондирования с нарастающей заблаговременностью // Наука. Инновации. Технологии. 2020. № 4. С. 137–148.
4. Кагермазов А. Х., Созаева Л. Т. Использование глобальной модели атмосферы (GFS NCEP) для прогноза грозовых процессов с заблаговременностью до пяти суток. // Гидрометеорология и экология. 2021. № 65. С. 671–680. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-65-671-680>

5. Пишем свою нейросеть: пошаговое руководство [Электронный ресурс]. URL: <https://proglab.io/p/neural-nets-guide> (дата обращения: 1.08.2025).
6. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание: Пер. с англ. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
7. Aggarwal C. C. *Neural Networks and Deep Learning: A Textbook*. Springer, 2023. 541 p.
8. Climate change is showing its claws: The world is getting hotter, resulting in severe hurricanes, thunderstorms and floods [Electronic resource]. URL: <https://www.munichre.com/en/company/media-relations/media-information-and-corporate-news/media-information/2025/natural-disaster-figures-2024.html>. (accessed: 2.08.2025).
9. Dueben P., Wedi N., Saarinen S., Zeman C. Global simulations of the atmosphere at 1.45 km grid-spacing with the integrated forecasting system // *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 2020. Vol. 98. No 3. P. 551–572.
10. Dzombak B. Severe hailstorms are costly and hard to predict // *Eos*. 2021. № 102. <https://doi.org/10.1029/2021EO158268>
11. Haiden T., Janousek M., Vitart F., Ferranti L. Prates F. Evaluation of ECMWF forecasts, including the 2019 upgrade // *ECMWF Technical Memorandum*. 2019. No 853.
12. IBM SPSS Statistics 27. *Neural Networks*. [Electronic resource]. URL: <https://www.ibm.com/docs/ru/spss-statistics/27.0.0/> (accessed: 4.08.2025).
13. National Centers for Environmental Prediction [Electronic resource]. URL: <https://www.emc.ncep.noaa.gov/> (accessed: 4.08.2025).
14. Raupach T. H., Martius O., Allen J. T. et al. The effects of climate change on hailstorms // *Nat Rev Earth Environ*. 2021. No2. P. 213–226. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00133-9>
15. Wellmann C. et al. Comparing the impact of environmental conditions and microphysics on the forecast uncertainty of deep convective clouds and hail // *Atmos. Chem. Phys*. 2020. № 20. P. 2201–2219.

References

1. Abshaev AM, Abshaev MT, Barekova MV, Malkarova AM. Guidelines for organizing and conducting anti-hail work. Nalchik: Pechatnyy dvor, 2014. 508 p. (In Russ.).

2. Kagermazov AKh. Digital atmosphere. Modern methods and methodology for the study of dangerous meteorological processes and phenomena. Nalchik: Pechatnyy dvor; 2015. 215 p. (In Russ.).
3. Kagermazov AKh, Sozaeva LT. Validation the output data of the global model of the atmosphere on data of aerological sensing with increscent lead time. Science. Innovations. Technologies. 2020;(4):137–148 p. (In Russ.)
4. Kagermazov AKh, Sozaeva LT. Use of output data of the global model of the atmosphere (NCEP GFS) for forecasting thunderstorm processes with lead time of up to five days. Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2021;(65):671-680. (In Russ.). <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-65-671-680>
5. Writing our own neural network: a step-by-step guide. Available from: <https://proglib.io/p/neural-nets-guide> [Accessed 1 august 2025]. (In Russ.).
6. Haykin S. Neural Networks: A comprehensive Foundation (2nd Edition). New Jersey: Prentice Hall; 1998. 842 p.
7. Aggarwal CC. Neural Networks and Deep Learning: A Textbook. Springer; 2023. 541 p.
8. Climate change is showing its claws: The world is getting hotter, resulting in severe hurricanes, thunderstorms and floods. Available from: <https://www.munichre.com/en/company/media-relations/media-information-and-corporate-news/media-information/2025/natural-disaster-figures-2024.html> [Accessed 2 august 2025].
9. Dueben P, Wedi N, Saarinen S, Zeman C. Global simulations of the atmosphere at 1.45 km grid-spacing with the integrated forecasting system. Journal of the Meteorological Society of Japan. 2020;98(3):551-572.
10. Dzombak B. Severe hailstorms are costly and hard to predict. Eos. 2021;(102). Available from: <https://doi.org/10.1029/2021EO158268>
11. Haiden T, Janousek M, Vitart F, Ferranti L, Prates F. Evaluation of ECMWF forecasts, including the 2019 upgrade. ECMWF Technical Memorandum. 2019;(853).
12. IBM SPSS Statistics 27. Neural Networks. Available from: <https://www.ibm.com/docs/ru/spss-statistics/27.0.0/> [Accessed 4 august 2025].
13. National Centers for Environmental Prediction. Available from: <https://www.emc.ncep.noaa.gov> [Accessed 4 august 2025].

14. Raupach TH, Martius O, Allen JT et al. The effects of climate change on hailstorms. *Nat Rev Earth Environ.* 2021;(2):213–226. Available from: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00133-9>
15. Wellmann C. et al. Comparing the impact of environmental conditions and microphysics on the forecast uncertainty of deep convective clouds and hail. *Atmos. Chem. Phys.* 2020;(20):2201-2219.

Информация об авторах

Лежинка Танашевна Созаева – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Scopus ID: 57204527832, Researcher ID: AIC-6568-2022

Артур Хасанбиевич Кагермазов – заведующий лабораторией атмосферных конвективных явлений, кандидат физико-математических наук, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Scopus ID: 55185153100

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

Information about the authors

Lezhinka T. Sozaeva – Cand. Sci. (Physics and Maths), Associate Professor, senior research associate of the laboratory of atmospheric convective phenomena of Federal state budgetary institution «High-Mountain Geophysical Institute», Scopus ID: 57204527832, Researcher ID: AIC-6568-2022

Arthur Kh. Kagermazov – Cand. Sci. (Physics and Maths), head of the laboratory of atmospheric convective phenomena of Federal state budgetary institution «High-Mountain Geophysical Institute», Scopus ID: 55185153100

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



Научная статья

УДК 336.76

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.4>

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ЛЕДНИКА БОЛЬШОЙ АЗАУ (КАБАРДИНО-БАЛКАРИЯ) ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И МЕТЕОНАБЛЮДЕНИЙ (2018–2024 ГГ.)

Наталья Евгеньевна Рязанова^{1*},
Анастасия Дмитриевна Куракова²,
Айсылу Алмазовна Гайсина³

^{1,2,3} Московский государственный институт международных отношений
(д. 76/1 пр-т Вернадского, г. Москва, 119454, Россия)

¹ n.riazanova@inno.mgimo.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9439-0537>

² akurkova@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-8226-6517>

³ aisily.04@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-9632-8755>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

В данной статье представлено комплексное исследование, посвященное анализу многолетней динамики снежного покрова ледника Большой Азау, расположенного в Кабардино-Балкарской Республике. Исследование охватывает период с 2018 по 2024 год и основано на интеграции современных методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с глубоким статистическим анализом метеорологических данных. В ходе работы был проведен детальный расчет нормализованного разностного снежного индекса (NDSI), полученного из многолетних серий аэрофотоснимков и данных спутниковых систем. В результате была однозначно выявлена устойчивая негативная тенденция, характеризующаяся резким сокращением площади и продолжительности залегания зимнего снежного покрова. Установлено, что регрессия происходит со стабильной средней скоростью около 0,04 единицы NDSI в год, что свидетельствует об интенсивной абляции. При этом летние сезонные изменения не демонстрируют статистически значимой динамики, оставаясь в пределах межгодовой изменчивости. Климатический анализ параллельно показал значительный рост средних годовых и сезонных температур, особенно в критические летние месяцы, а также заметное снижение объемов зимних осадков, что нарушает баланс массы ледника. Эти взаимосвязанные климатические

факторы комплексно и необратимо влияют на ускорение темпов деградации ледника, сокращая его объем и площадь. Полученные результаты в очередной раз подчеркивают критическую важность организации непрерывного системного мониторинга криосферы и безотлагательной разработки стратегических адаптационных мер. Такие действия необходимы для смягчения растущих экологических и социально-экономических рисков, непосредственно связанных с интенсивным изменением ледникового покрова в уязвимой горной среде Северного Кавказа.

Ключевые слова: деградация ледников, ДЗЗ, лавины, климат, горные экосистемы, Кабардино-Балкария, Большой Азау

Для цитирования: Рязанова Н. Е., Куракова А. Д., Гайсина А. А. Анализ динамики снежного покрова ледника Большой Азау (Кабардино-Балкария) по данным дистанционного зондирования и метеонаблюдений (2018–2024 гг.) // Наука. Инновации. Технологии. 2025. №4. С. 85–104. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.4>

Благодарности: авторы выражают благодарность благотворительному фонду «Возрождение природы» за финансовую поддержку исследования.

Финансирование: исследование выполнено при финансовой поддержке благотворительного фонда «Возрождение природы».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.08.2025;
одобрена после рецензирования 27.11.2025;
принята к публикации 12.12.2025.

1.6.21. Geocology (Geographical Sciences)

Research article

Analysis of snow cover dynamics of the Bolshoy Azau glacier (Kabardino-Balkaria) using remote sensing and meteorological data (2018–2024)

Natalia E. Ryazanova^{1*},
Anastasia D. Kurakova^{2*},
Aislyu A. Gaisina^{3*}

^{1, 2, 3} Moscow State Institute of International Relations (76/1 Vernadskogo Ave., Moscow, 119454, Russia)

¹ n.riazanova@inno.mgimo.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9439-0537>

² akurkova@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-8226-6517>

³ aisily.04@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-9632-8755>

* Corresponding author

Abstract.

The study analyzes the long-term dynamics of the snow cover of the Bolshoy Azau Glacier, located in the

Kabardino-Balkarian Republic. The research covers the period from 2018 to 2024 and is based on the integration of modern methods of remote sensing (RS) with in-depth statistical analysis of meteorological data. The work involved a detailed calculation of the Normalized Difference Snow Index (NDSI), derived from long-term series of aerial photographs and satellite system data. As a result, a clear and persistent negative trend was identified, characterized by a sharp reduction in the area and duration of winter snow cover. It was established that the regression occurs at a stable average rate of approximately 0.04 NDSI units per year, indicating intensive ablation. At the same time, summer seasonal changes do not show statistically significant dynamics, remaining within the limits of interannual variability. Parallel climatic analysis revealed a significant increase in average annual and seasonal temperatures, particularly during the critical summer months, as well as a notable decrease in winter precipitation volumes, which disrupts the mass balance of the glacier. These interconnected climatic factors comprehensively and irreversibly influence the acceleration of glacier degradation, reducing its volume and area. The obtained results once again underscore the critical importance of establishing continuous systematic cryospheric monitoring and the urgent development of strategic adaptation measures. Such actions are necessary to mitigate the growing environmental and socio-economic risks directly associated with the intense transformation of the glacial cover in the vulnerable mountain environment of the North Caucasus.

- Keywords:** glacier degradation, remote sensing, avalanches, climate, mountain ecosystems, Kabardino-Balkaria, Bolshoy Azau
- For citation:** Riazanova NE, Kurakova AD, Gaisina AA. Analysis of Snow Cover Dynamics of the Bolshoy Azau Glacier (Kabardino-Balkaria) Using Remote Sensing and Meteorological Observation Data (2018–2024). *Science. Innovations. Technologies.* 2025;(4): 85–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.4>
- Funding:** this study was performed with the financial support of the Revival of Nature Charitable Foundation.
- Acknowledgments:** the authors express their gratitude to the Nature Revival Charitable Foundation for the financial support of this research.
- Conflict of interest:** the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 09.08.2025;
approved after reviewing 27.11.2025;
accepted for publication 12.12.2025.

Введение

По данным Росгидромета за период с 1957 по 2023 годы, одним из наиболее интенсивно деградирующих ледников на территории Северного Кавказа является ледник Большой Азау, расположенный на южных склонах Эльбруса (Геогр. координаты: 43.28° с.ш., 42.44° в.д.) [1]. Этот ледник, являющийся крупнейшим в Кабардино-Балкарской Республике, представляет собой значимый природный объект, а также популярную туристическую зону региона [2]. Однако в последние десятилетия наблюдается ускорение динамики сокращения его снежного покрова. В ряду последствий этого выделяется рост случаев обвально-осыпных процессов. Обвально-осыпные процессы широко распространены в пределах Приэльбрусья, особенно на большей части склонов долин рек Баксан, Азау, Адыл-Су, Юсенги [3]. Опасность этих явлений для местного населения и туристов обуславливает необходимость в изучении причин изменения горных экосистем.

С начала 1960-х годов фиксируются многочисленные крупномасштабные лавинные процессы на леднике Большой Азау [4], отличающиеся высокой степенью непредсказуемости по шкале, скорости и периодичности проявлений [4], что усложняет разработку эффективных профилактических и защитных мер. Так, в 2005 году сход лавины привёл к разрушению электроподстанции «Терскол» ОАО «Каббалкэнерго», вызвав длительные перебои в энергоснабжении региона с материальным ущербом свыше 10 млн рублей [5]. В 2015 году произошло крупное отложение рыхлообломочного материала в долине реки Терскол площадью около 2800 тыс. м² и высотой насыпи 150–170 м [6].

Летние и зимние температурные условия и осадочный режим являются факторами лавинообразования [4, 6, 7, 8]. В рамках данного исследования рассматривается связь между приведенными климатическими факторами и деградацией ледникового покрова, в целях оценки лавинопасности района. На основании этого основная цели настоящей работы:

- определить изменение площади снежного покрова ледника Большой Азау за период 2018–2024 гг. с использованием аэрофотоснимков и спутниковых данных;

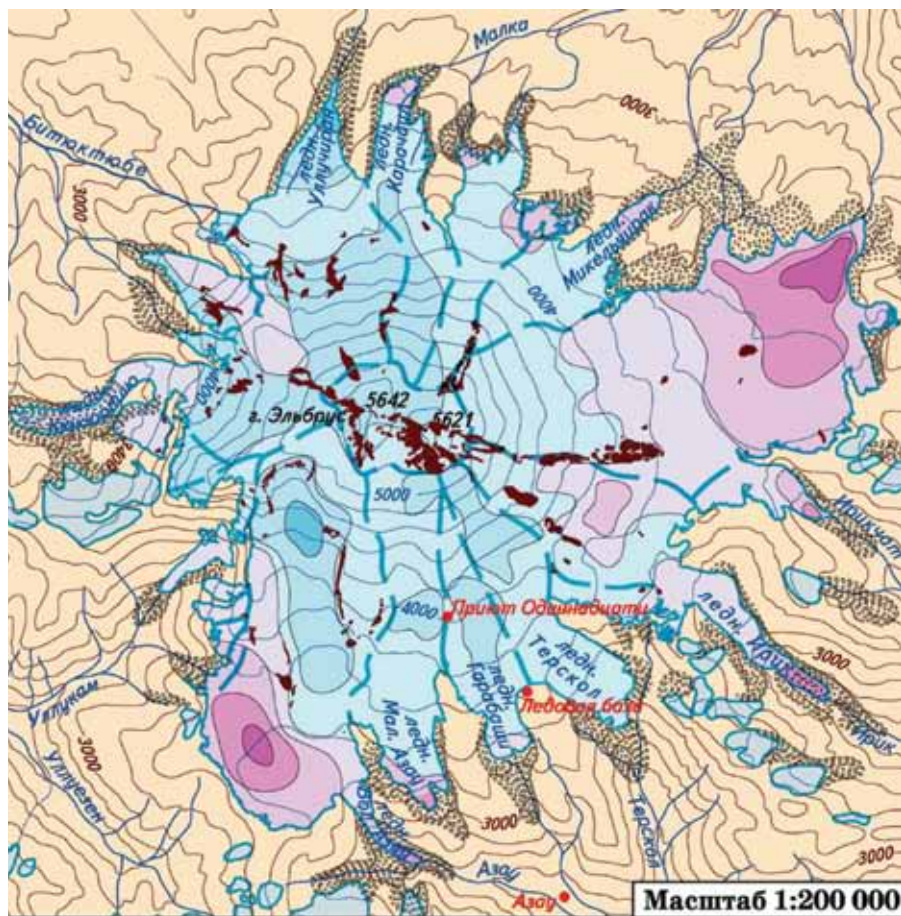
- сопоставить данные изменения площади ледника с данными климатических параметров региона за период с 2020–2024 гг. и обсудить возможную связь между ними.

По данным мониторинга Росгидромета, за период с 2011 по 2021 год площадь ледника Большой Азау уменьшилась на 2,21 км² с первоначальной площади 18,4 км² и длиной 9,2 км (рис. 1) [1]. Исторические данные фиксируют максимальное продвижение языка ледника в долине реки Баксан в период 1849–1876 гг., когда нижняя граница достигла отметки ниже 2300 м над уровнем моря [7, 8]. За период 1957–1978 гг. ледник отступил более чем на 1300 м, а с 1986 по 2000 год – на 1200 м [8].

В этом контексте дополнительно важны геохимические процессы, подчеркивающие роль химического состава и свойств горных пород и почв в формировании устойчивости ледникового покрова. Геохимические поля почв и горных пород Большого Кавказа отражают длительную эволюцию ландшафта, которая оказывает влияние на гидрологические условия и скорость деградации ледников. Изменения в химическом составе почвы и литогенных компонентов влияют на водный баланс, регулируя процессы водопроницаемости и аккумуляции влаги, что, в свою очередь, влияет на темпы таяния и накопления льда [9].

Статистические исследования климатических условий региона фиксируют тенденцию к росту средних температур и экстремальных значений. В частности, с 1961 по 2020 годы летняя средняя температура в поселке Терскол увеличилась на 0,31 °C за десять лет, что влияет на динамику ледников [10] [11] [12]. Период с 2001–2021 гг. характеризовался развитием деградацией оледенения ледника, а также ростом скоростью годовой температуры в Терсколе увеличилась (0,70°C/10 лет) [11]. В том числе наблюдался рост зимних (0,16°C/год) и весенних (0,08°C/10 лет) температур [10]. Анализ продолжения деградации ледникового покрова в рамках международного проекта GLIMS показал, что средняя скорость сокращения площади ледников Эльбруса возросла с 0,034 км²/год (1986–2000 гг.) до 0,16 км²/год (2000–2014 гг.), свидетельствуя о значительном ускорении процессов таяния [12]. Древние оледенения и трансфор-

Эльбрус



Изменение высоты поверхности ледника, м. 1957–1997 гг.

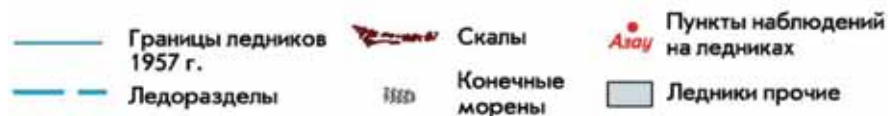


Рис. 1.

Карта Эльбруса и части Приэльбрусья.

Fig. 1. Map of Elbrus and a part of the Elbrus area.

Источник: <https://geographyofrussia.com/ledniki-gornyx-regionov-rossii/>.Source: <https://geographyofrussia.com/ledniki-gornyx-regionov-rossii/>.

мация высотной поясности связаны с ростом природных опасностей, таких как лавины и сели, что подтверждает данные об ухудшении состояния ледника Большой Азау [13].

Исследование данной проблематики является актуальной не только с теоретической точки зрения, но и с позиции разработки практических мер по снижению экологических и инфраструктурных рисков, обеспечению безопасности населения и устойчивого развития горных территорий.

Материалы и методы исследований

В данном исследовании использованы методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и комплексный анализ метеорологических данных с целью создания картографических материалов, отражающих динамику снежного покрова ледника Большой Азау за период 2018–2024 гг. В качестве источника данных применены аэрофотоснимки, космоснимки платформы Google Earth Pro и мультиспектральные снимки Landsat-9 (USGS). Критерии отбора изображений включали: 1) высокое пространственное разрешение (≤ 10 м), 2) наличие атмосферной коррекции уровня L2A, 3) облачность не более 20%, 4) даты съёмки с 1 января 2018 г по 1 января 2024 г.

Для анализа сезонной динамики снежного покрова для каждого года исследования отбирались снимки за летний (июнь–август) и зимний (декабрь–февраль) периоды. Обработка данных выполнена с использованием ГИС-пакета QGIS версии 3.42.1 с применением полуавтоматизированных методов классификации. Выделение снежного покрова на космоснимках осуществлено посредством нормализованного разностного снежного индекса (NDSI), рассчитанного по формуле:

$$\text{NDSI} = (\text{BAND 3} - \text{BAND 6}) / (\text{BAND 3} + \text{BAND 6}),$$

где BAND 3 – зелёная зона спектра (560 нм);

BAND 6 – SWIR-канал (1610 нм).

Для корреляции изменений снежного покрова с климатическими параметрами результаты расчёта NDSI сопоставлены

с данными гидрометеорологической службы посёлка Терскол за 2020–2024 гг. [14].

Результаты исследований и их обсуждение

В ходе выполнения исследования был сформирован комплект из 20 картографических материалов, отображающих распределение NDSI на леднике Большой Азау за период 2018–2024 гг. Значения NDSI варьируются в диапазоне от -1 до $+1$, где показатели выше $0,4$ указывали на наличие снежного покрова, а отрицательные значения сигнализировали о его отсутствии. Примеры таких материалов, отражающих распределение индекса NDSI с использованием комбинаций каналов 7–5–3 и 3–2–1 за летний и зимний периоды 2018 года, представлены на рисунках 2, 3, 4.

Полученные данные продемонстрировали колебания NDSI в диапазоне от $0,50$ до $-0,25$, что свидетельствует о сохранении снежного покрова, однако с тенденцией к его постепенному сокращению. Линейный тренд изменения зимних значений индекса ($y = -0,0435x + 0,1971$) отражает устойчивое снижение со средней скоростью около $0,04$ единицы в год. Если в период 2015–2017 гг. зимние значения NDSI превышали $0,25$, то к 2024 году они приблизились к нулевой отметке, указывая на деградацию снежного покрова. Коэффициент корреляции Пирсона (r) между значениями зимнего NDSI и временным рядом (годы 2018–2024) оказался равен $-0,89$, что свидетельствует о сильной обратной связи между временем и индексом снежного покрова. Полученный коэффициент $p=0,005$ подтверждает статистическую значимость отрицательного тренда снижения зимних значений NDSI на уровне значимости $0,01$.

Летние значения индекса преимущественно находились в отрицательной области (от $0,40$ до $-0,60$), что соответствует типичному сезонному таянию снега. Несмотря на формально наблюдаемый положительный тренд летних значений ($y = 0,033x - 0,05$), он не носит климатически значимого характера, поскольку значения остаются в отрицательном диапазоне. Для летних значений NDSI коэффициент корреляции был заметно ниже – $r = 0,18$, при $p = 0,67$, что указывает на отсутствие статистически значимой тенденции изменения снежного покрова летом на исследуемом промежутке.

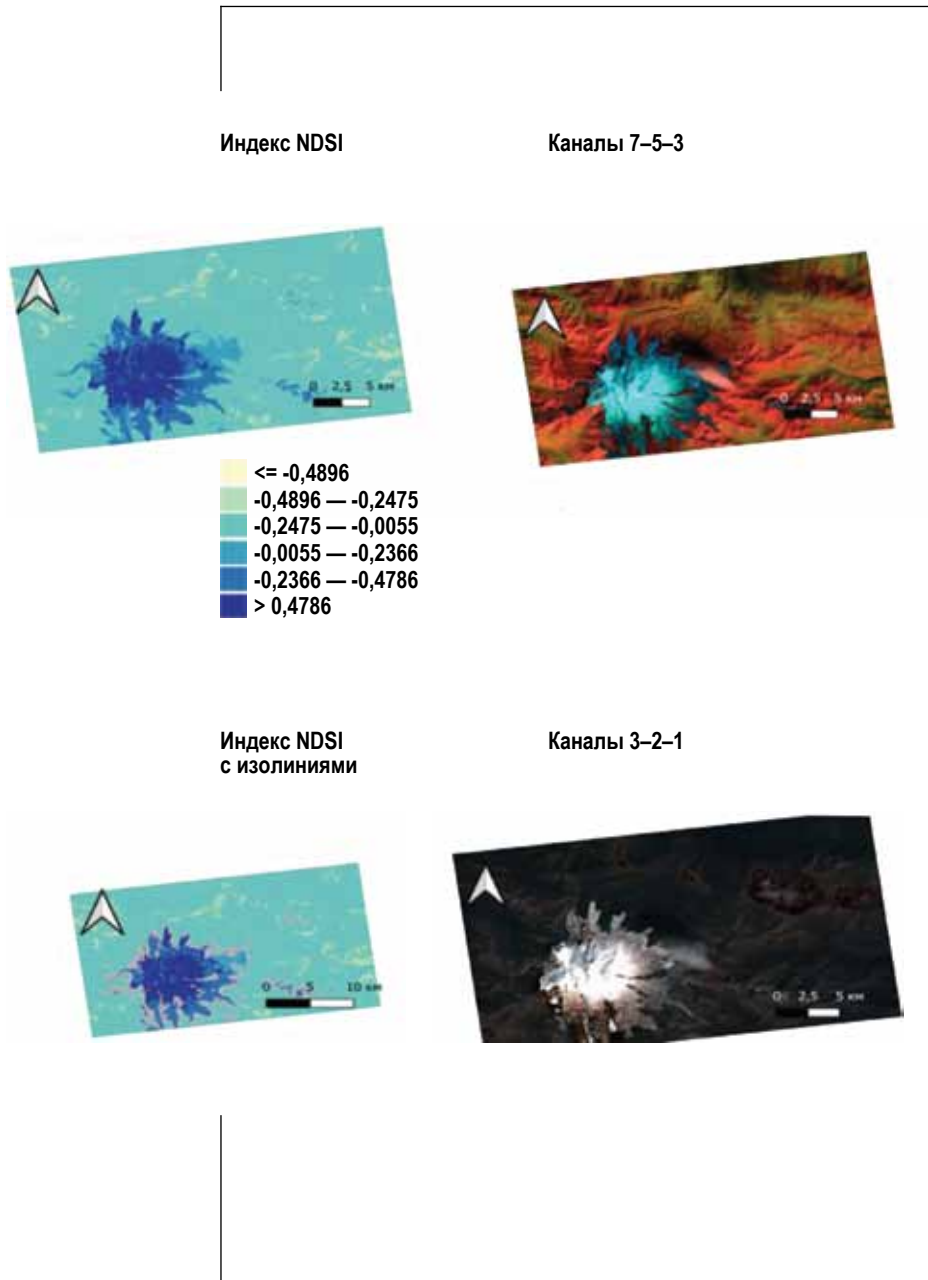


Рис. 2.

Картографический материал с индексом NDSI (комбинации каналов 7-5-3 и 3-2-1) за летний период 2018 г.

Fig. 2. Cartographic material with the Normalized Difference Snow Index (NDSI) (band combinations 7-5-3 and 3-2-1) for the summer period of 2018.

Источник: составлено авторами в приложении "Qgis".

Source: compiled by the authors in the Qgis app.

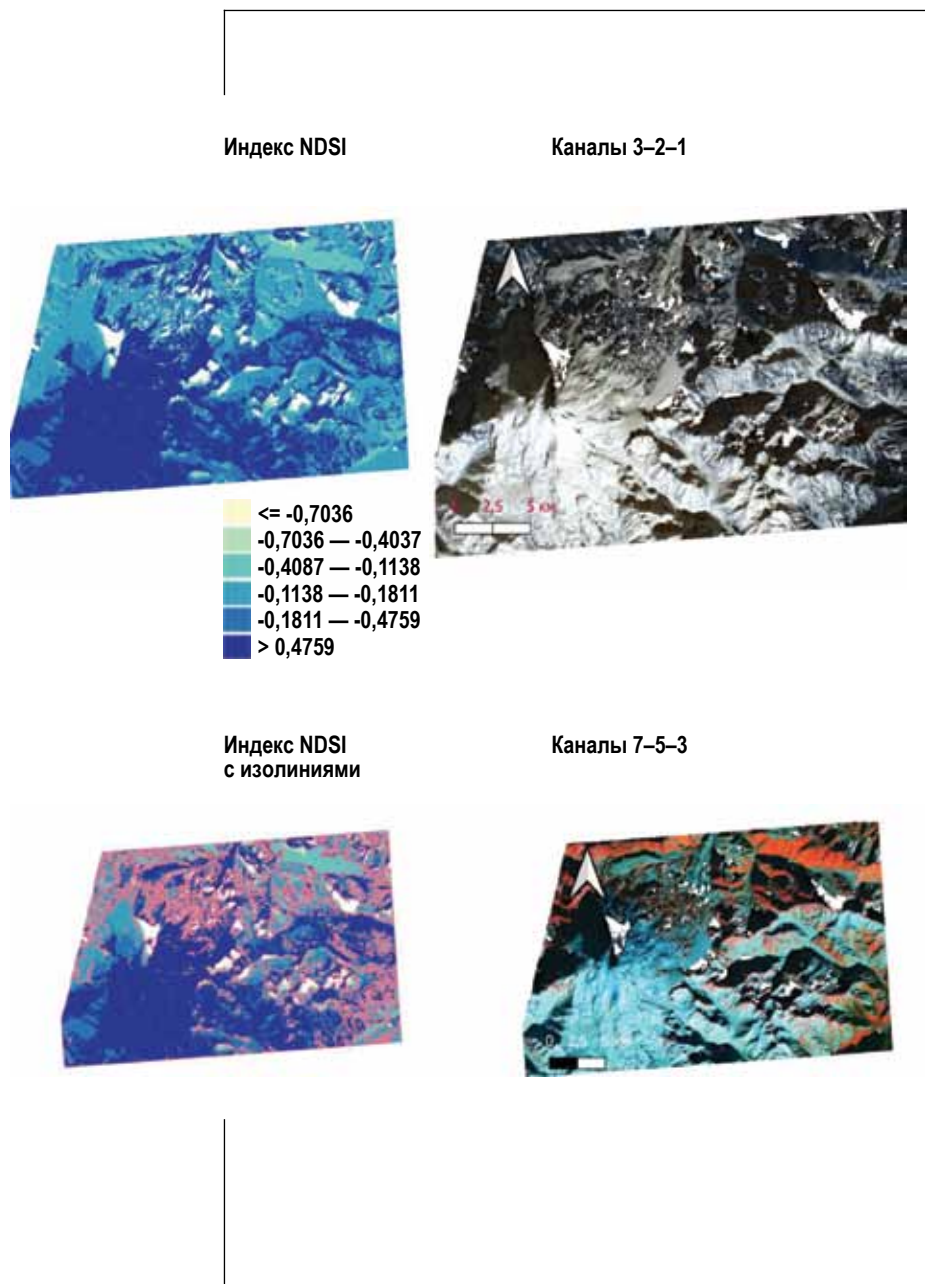


Рис. 3. Картографический материал с индексом NDSI (комбинации каналов 7-5-3 и 3-2-1) за зимний период 2018 г.

Fig. 3. Cartographic material with the Normalized Difference Snow Index (NDSI) (band combinations 7-5-3 and 3-2-1) for the winter period of 2018.

Источник: составлено авторами в приложении "Qgis".

Source: compiled by the authors in the Qgis app.



Рис. 4. Изменение средних значений индекса NDSI в зимнее (1) и летнее (2) время с 2018 по 2024 г.

Fig. 4. Changes in average values of the NDSI during the winter (1) and summer (2) periods from 2018 to 2024.

Источник: составлено авторами.
Source: compiled by authors.

Особое значение имеют снежный и ледниковый покров, регулирующие водный баланс горных территорий, а также формирующие микроклимат и обеспечивающие устойчивость экосистем. Сокращение снежного покрова и деградация ледников приводит к изменениям в гидрологическом режиме – например, к снижению летних стоков, изменению плоскостных и селевых процессов, что непосредственно влияет на традиционные методы землепользования и облик культурных ландшафтов. Природные факторы воздействуют не только на ландшафтную структуру и функции, но и тесно связаны с этнокультурным развитием населения, так как традиционные хозяйственные практики адаптированы к естественным условиям. [15]

Для оценки связи между динамикой снежного покрова и температурным режимом был проведён анализ сезонного хода температуры воздуха в поселке Терскол за период 2020–2024 гг. (табл. 1, рис. 5).

Таблица 1. СЕЗОННЫЙ ХОД СРЕДНИХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА В ПОСЕЛКЕ ТЕРСКОЛ (2020–2024 ГГ.). ДАННЫЕ СОСТАВЛЕНЫ АВТОРАМИ НА БАЗЕ ОТКРЫТЫХ ИСТОЧНИКОВ [15]
Table 1. Seasonal variation of mean air temperatures in the settlement of Terskol (2020–2024). Data compiled by the authors based on open sources

Год	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Среднее значение по году	Максимальные значения	Минимальные значения
2020	-7,5	-6,4	0,0	0,8	7,6	11,6	13,9	10,8	11,2	7,1	-2,2	-5,6	3,4	13,9	-6,4
2021	-4,6	-4,2	-5,9	3,1	8,7	12,3	13,2	13,3	7,2	2,5	-0,3	-4,7	3,4	13,3	-5,9
2022	-6,8	-5,1	-7,3	3,7	5,9	11,2	12,6	14,8	10,0	4,3	0,5	-4,9	3,2	14,8	-7,3
2023	-7,0	-8,2	0,4	3,1	6,6	11,1	13,0	15,1	9,6	5,0	1,4	-1,5	4,1	15,1	-8,2
2024	-6,4	-3,5	-1,5	7,4	5,7	13,0	13,2	13,6	10,2	3,2	-2,1	-5,5	4,0	13,6	-5,5
Среднее значение по месяцам	-6,4	-5,5	-2,9	3,6	6,9	11,8	3,2	13,5	9,6	4,4	-0,5	-4,4	3,6	14,1	-6,7

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

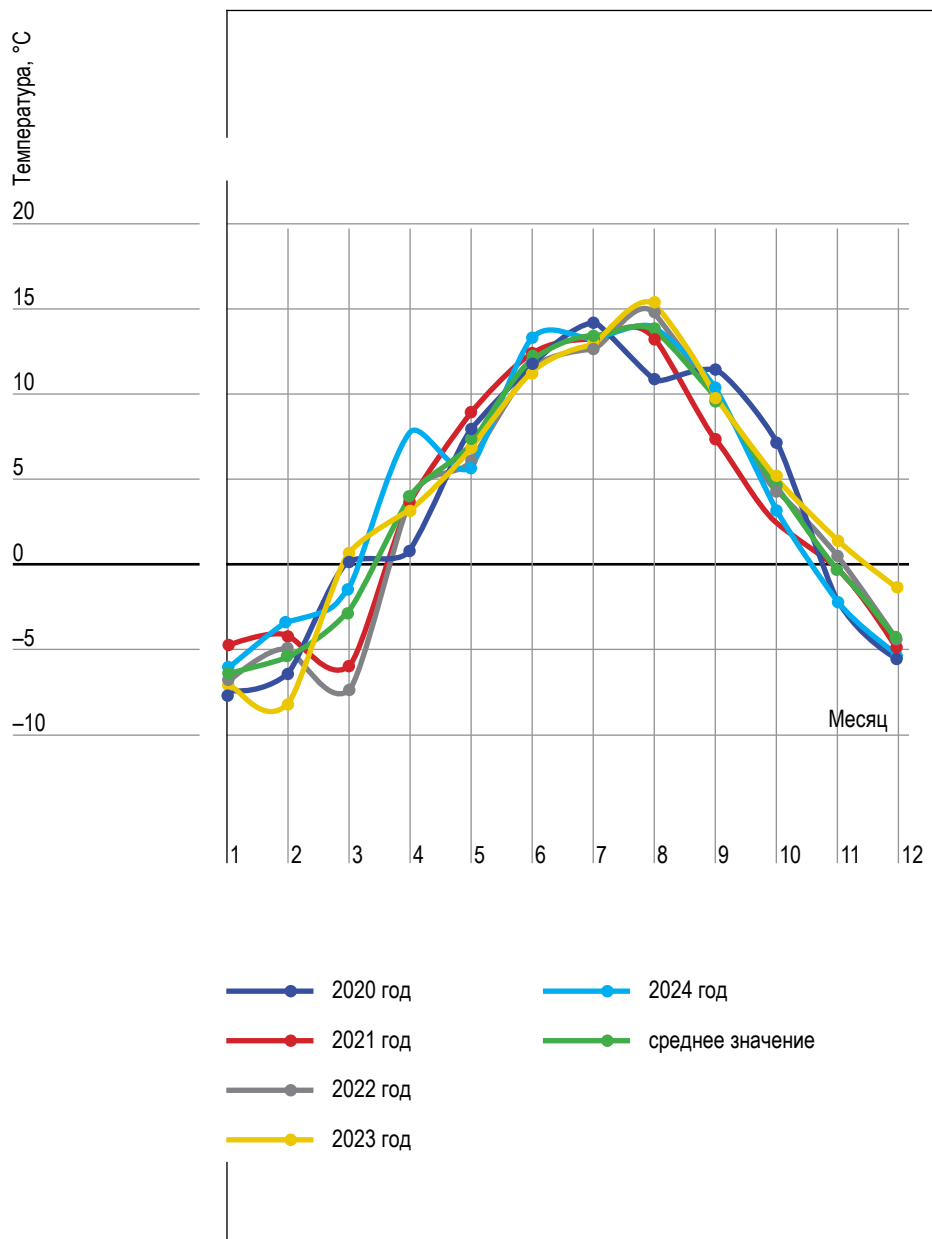


Рис. 5. Графическое отображение температурного хода в поселке Терскол за 2020–2024 гг., составлено авторами на основе данных [13].

Fig. 5. Graphical representation of the temperature trend in the settlement of Terskol for 2020–2024, compiled by the authors based on data.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

Сопоставление данных показывает значительный рост средних температур в августе – с $+13,3^{\circ}\text{C}$ в 2021 году до рекордных $+15,1^{\circ}\text{C}$ в 2023 году, причём максимальное значение августа 2023 года совпадает с минимальным летним показателем NDSI, достигшим $-0,40$ (рис. 4). Анализ данных Росгидромета за период 1991–2020 гг. фиксирует зимние температурные аномалии в районе посёлка Терскол порядка $+1,6^{\circ}\text{C}$ относительно многолетней нормы [1]. Такие тенденции указывают на значительное зимнее потепление, способствующее сокращению снежного покрова. При этом в последние пять лет не наблюдается заметных отрицательных температурных отклонений в зимние месяцы (январь $-6,4^{\circ}\text{C}$, декабрь $-4,4^{\circ}\text{C}$), несмотря на стабильное уменьшение снежного покрова (рис. 4). Это позволяет предположить, что отрицательная динамика индекса NDSI может быть связана преимущественно с сокращением количества осадков. В рамках настоящего исследования отсутствуют данные о динамике сумм осадков из-за их труднодоступности, однако имеющиеся данные Росгидромета по пос. Терскол фиксируют отрицательный тренд зимних осадков ($-0,33$ мм/10 лет) [1]. На основе этого делается вывод, что значимым фактором деградации снежного покрова ледника Большой Азау за последние выступает уменьшение объёма зимних осадков, что в совокупности с повышением температуры ускоряет процессы таяния ледникового покрова.

Заключение

В заключение отметим, что проведенное исследование продемонстрировало тенденцию устойчивого сокращения снежного покрова ледника Большой Азау в период 2018–2024 годов. Анализ результатов NDSI показал значимое снижение зимнего снежного покрова со средней скоростью около 0,04 единицы в год, что статистически подтверждается высокой отрицательной корреляцией ($r = -0,89$, $p = 0,005$). Летние значения NDSI не отличаются аномалиями и оставались преимущественно в отрицательной зоне, отражая традиционный сезонный процесс таяния снега. Анализ гидрометеорологических данных выявил рост средних температур, особенно в августе, где максимальные значения 2023 года ($+15,1^{\circ}\text{C}$) совпали с минимальными летними показателями снежного покро-

ва (-0,40). Таким образом, на основе полученных данных, а также долгосрочных данных Росгидромета и данных других научных исследований можно предполагать комплексное воздействие увеличения температуры воздуха и сокращения зимних осадков на деградацию ледникового покрова Большого Азау. Результаты исследования подчеркивают необходимость продолжения мониторинга и разработки адаптационных мер для смягчения негативных последствий климатических изменений в горной среде Северного Кавказа. Сравнительный анализ социально-экономического развития регионов Северного Кавказа подчеркивает необходимость комплексного управления природными рисками и адаптации к экологическим вызовам [16]

Таяние ледников традиционно вызывает увеличение рисков возникновения лавин, селевых потоков и камнепадов, что существенно повышает угрозу безопасности людей и инфраструктуры в горных районах [17]. Быстрая деградация ледника Большой Азау сопровождается потенциальной угрозой гляциальных селей из-за отколов мертвого льда и активизации опасных природных явлений, усугубленных потеплением и изменением гидрологического режима региона [18]. Кроме того, уменьшение ледникового покрова снижает водные запасы, что влияет на водоснабжение и экосистемы ниже по течению рек, создавая долгосрочные социально-экологические вызовы [19]. Таким образом, результаты подчеркивают важность учета этой взаимосвязи при разработке стратегий адаптации и управления природными рисками в Северном Кавказе, обеспечивая комплексный подход к контролю изменений в горной среде и повышению устойчивости к природным опасностям [20].

Список источников

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. М.: Изд-во МГУ, 2025. 104 с.
2. Мельник А. В., Рототаев Ю. Г., Котляков В. М. Современное состояние и динамика ледников Эльбрусского района по данным дистанционного зондирования // Криосфера Земли. 2021. Т. 25. № 3. С. 56–67.
3. Сейнова И. Б., Золотарев Е. А. Ледники и сели Приэльбрусья (эволюция опеденения и селевой активности). М.: Научный мир, 2001. 203 с.

4. Олейников А. Д., Володичева Н. А. Зимы лавинного максимума на Большом Кавказе за период инструментальных наблюдений (1968–2016 гг.) // Лёд и Снег. 2020. Т. 60, № 4. С. 567–578. <https://doi.org/10.31857/S2076673420040057>
5. Акимов В. А., Соколов Ю. И. Наиболее крупные чрезвычайные ситуации в России и мире в 2005 году // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2014. № 1. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/naibolee-krupnye-chrezvychaynye-situatsii-v-rossii-i-mire-v-2005-godu> (дата обращения: 10.09.2025).
6. Активность и опасность проявления обвально-осыпных процессов на территории Кабардино-Балкарской республики / В. В. Разумов, Р. О. Калов, Н. Д. Богданова, Н. В. Разумова, Н. Г. Лиховид // Наука. Инновации. Технологии. 2023. № 4. С. 119–153.
7. Васильчук Ю. К., Чижова Ю. Н., Буданцева Н. А. Быстрое сокращение ледника Большой Азау в Приэльбрусье на фоне стабильных климатических условий и возникающие при этом риски // Геориск. 2010. Вып. 2. С. 16–29.
8. Tashilova A. Analysis of climate change in Terskol over the last 60 years // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 840. 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/840/1/012038>.
9. Дегтярева Т. В., Шальнев В. А., Лысенко А. В. Геохимические поля горных пород и почв Большого Кавказа: эволюционный подход и методы исследования // Устойчивое развитие горных территорий. Владикавказ: Изд-во СКГМИ, 2017. С. 219–230.
10. Современная деградация долинных ледников Центрального Кавказа / М. Ю. Беккиев, М. Д. Докукин, Р. Х. Калов, А. А. Ташилова // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 8. № 3. С. 113–141. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-3-113-141>.
11. Возраст морен ледника Большой Азау в верховьях долины реки Баксан по дендрохронологическим данным / О. Н. Соломина, И. С. Бушуева, Н. А. Володичева, Е. А. Долгова // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 2. С. 271–290. <https://doi.org/10.31857/S2076673421020088>.
12. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020 / L. G. Tielidze, G. A. Nosenko, T. E. Khromova, F. Paul // The Cryosphere. 2022. Vol. 16. P. 489–504. <https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022>.

13. Ретроспективная оценка изменений баланса массы ледника Азау (Центральный Кавказ) за 150 лет / В. В. Васюченко, Ю. А. Чижова, А. К. Буданов, М. В. Мухаметов // Лёд и снег. 2010. № 1 (109). С. 19–32.
14. Лысенко А. В. Природные факторы формирования культурных ландшафтов Северного Кавказа // Вестник АПК Ставрополя. 2013. Вып. 4(12). С. 190–193.
15. Официальная страница сайта компании (ООО) «Расписание Погоды» [Электронный ресурс]. URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Терсколе (дата обращения: 09.06.2025).
16. Щитова Н. А., Чихичин В. В. Сравнительный анализ социально-экономического развития регионов Северного Кавказа // Наука. Инновации. Технологии. 2014. № 1. С. 161–174.
17. Всемирная метеорологическая организация (ВМО). Таяние ледников вызовет лавину каскадных последствий [Электронный ресурс] // WMO News. 2025. URL: <https://wmo.int/ru/news/media-centre/tayanie-lednikov-vyzovet-lavinu-kaskadnykh-posledstviy> (дата обращения: 26.11.2025).
18. Васильчук В. В., Чиж В. И., Будько М. В. Быстрое сокращение ледника Большой Азау в Приэльбрусье на фоне стабильных климатических условий и возникающие при этом риски // Геориск. 2010. №2. С. 10–14.
19. Останин Е. А. Экологические последствия деградации ледников Кавказа // Экологический вестник Северного Кавказа. 2025. № 3. С. 45–52. URL: <https://www.geoinfo.ru/product/sluzhba-novostej-geoinfo/kakie-ehkologicheskie-posledstviya-vlechet-za-soboj-ischeznovenie-lednik> (дата обращения: 26.11.2025).
20. Иванов Т. П. Уменьшение водных ресурсов региона как проблема устойчивого развития // Международный исследовательский журнал. 2023. Вып. 1. С. 102-109. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.70>.

References

1. Report on the Features of the Climate on the Territory of the Russian Federation for 2024. M.: Moscow State University Publishing House; 2025. 104 p. (In Russ.).
2. Melnik AV, Rototaev YuG, Kotlyakov VM. Current State and Dynamics of the Glaciers in the Elbrus Region According to

- Remote Sensing Data. *Earth's Cryosphere*. 2021;25(3):56-67. (In Russ.).
3. Seinova IB, Zolotarev EA. Glaciers and Mudflows of the Elbrus Region (Evolution of Glaciation and Mudflow Activity). M.: Nauchnyy Mir; 2001. 203 p. (In Russ.).
 4. Oleinikov AD, Volodicheva NA. Winters of Avalanche Maximum in the Greater Caucasus over the Period of Instrumental Observations (1968-2016). *Ice and Snow*. 2020;60(4):567-578. <https://doi.org/10.31857/S2076673420040057>. (In Russ.).
 5. Akimov VA, Sokolov Yul. The Largest Emergencies in Russia and the World in 2005. *Civil Protection Strategy: Problems and Research*. 2014. No. 1. Available from: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/naibolee-krupnye-chrezvychnyye-situatsii-v-rossii-i-mire-v-2005-godu> (Accessed 10 September 2025). (In Russ.).
 6. Razumov VV, Kalov RO, Bogdanova ND, Razumova NV, Likhovid NG. Activity and Hazard of Rockfall and Talus Processes in the Kabardino-Balkarian Republic. *Science. Innovations. Technologies*. 2023;(4): 119–153. (In Russ.).
 7. Vasilchuk YuK, Chizhova YuN, Budantseva NA. Rapid Reduction of the Bolshoy Azau Glacier in the Elbrus Region Against the Background of Stable Climatic Conditions and the Associated Risks. *Georisk*. 2010;(2):16-29. (In Russ.).
 8. Tashilova A. Analysis of climate change in Terskol over the last 60 years. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 840. 012038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/840/1/012038>.
 9. Degtyareva TV, Shalnev VA, Lysenko AV. Geochemical Fields of Rocks and Soils of the Greater Caucasus: An Evolutionary Approach and Research Methods. *Sustainable Development of Mountain Territories*. Vladikavkaz: SKGMI Publishing House; 2017. P. 219-230. (In Russ.).
 10. Bekkiev MYu, Dokukin MD, Kalov RKh, Tashilova AA. Modern Degradation of Valley Glaciers of the Central Caucasus. *Fundamental and Applied Climatology*. 2021;8(3):113-141. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2021-3-113-141>. (In Russ.).
 11. Solomina ON, Bushuyeva IS, Volodicheva NA, Dolgova EA. Age of the Bolshoy Azau Glacier Moraines in the Upper Baksan River Valley Based on Dendrochronological Data. *Ice and Snow*. 2021;61(2):271-290. <https://doi.org/10.31857/S2076673421020088>. (In Russ.).

12. Tielidze LG, Nosenko GA, Khromova TE, Paul F. Strong acceleration of glacier area loss in the Greater Caucasus between 2000 and 2020. *The Cryosphere*. 2022;(16):489-504. <https://doi.org/10.5194/tc-16-489-2022>.
13. Vasyuchenko VV, Chizhova YuA, Budanov AK, Mukhametov MV. Retrospective assessment of mass balance changes of the Azau glacier (Central Caucasus) over 150 years. *Ice and Snow*. 2010;109(1):19-32. (In Russ.).
14. Lysenko AV. Natural Factors in the Formation of Cultural Landscapes of the North Caucasus. *Bulletin of APC Stavropol*. 2013;4(12):190-193. (In Russ.).
15. Official website of the company "Raspisanie Pogody" LLC Available from: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Терсколе (Accessed 09 June 2025). (In Russ.).
16. Shchitova NA, Chikhichin VV. Comparative Analysis of Socio-Economic Development of the North Caucasus Regions. *Science. Innovations. Technologies*. 2014;(1):161-174. (In Russ.).
17. World Meteorological Organization (WMO). Melting Glaciers Will Cause an Avalanche of Cascading Consequences WMO News. 2025. Available from: <https://wmo.int/ru/news/media-centre/tayanie-lednikov-vyzovet-lavinu-kaskadnykh-posledstviy> (Accessed 26 November 2025). (In Russ.).
18. Vasilchuk VV, Chizh VI, Budko MV. Rapid Reduction of the Bolshoy Azau Glacier in the Elbrus Region against the backdrop of stable climatic conditions and the risks that arise. *Georisk*. 2010;(2):10-14. (In Russ.).
19. Ostanin EA. Environmental Consequences of the Degradation of the Caucasus Glaciers. *Ecological Bulletin of the North Caucasus*. 2025;(3):45-52. URL: <https://www.geoinfo.ru/product/sluzhba-novostej-geoinfo/kakie-ehkologicheskie-posledstviya-vlechetsa-soboj-ischeznovenie-lednik> (Accessed 26 November 2025). (In Russ.).
20. Ivanov TP. Reduction of Water Resources in the Region as a Problem of Sustainable Development. *International Research Journal*. 2023;(1):102-109. – <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.70>. (In Russ.).

Информация об авторах

Наталья Евгеньевна Рязанова – кандидат географических наук, доцент кафедры международных комплексных проблем природопользования и экологии МГИМО МИД России.

Анастасия Дмитриевна Куракова – студент 3 курса МГИМО МИД России направления «Экология и природопользования», обладательница гранта «Возрождение природы».

Айсылу Алмазовна Гайсина – студент 3 курса МГИМО МИД России направления «Экология и природопользования», обладательница гранта «Возрождение природы».

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

Information about the authors

Natalia E. Ryazanova, Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor of the Department of International Complex Problems of Environmental Management and Ecology, MGIMO University

Anastasia D. Kurakova, 3rd year student, Ecology and Environmental Management program, MGIMO University, Russian Federation, holder of the Nature Revival grant

Aisylu A. Gaisina, 3rd year student, Ecology and Environmental Management program, MGIMO University, Russian Federation, holder of the Nature Revival grant

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



Научная статья

УДК

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.5>

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ МАССИВНОЙ НЕФТЯНОЙ ОТОРОЧКИ КРУПНОГО ШЕЛЬФОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СЕВЕРНОГО КАСПИЯ

Артём Дмитриевич Белугин^{1*},
Роман Александрович Зайцев²,
Михаил Андреевич Агупов³

^{1,2} Филиал ТОО «ФЭС» (д. 2, ул. Суцневский вал, Москва, 127055, Российская Федерация)

³ ТОО «Kalamkas-Khazar Operating» (12 микрорайон, 74/1, Актау, 130000, Казахстан)

¹ artem.belugin.94@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-8179-7192>

² ZaytsevRoman90@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3845-5030>

³ mikhail.agupov@kalamkas-khazar.kz; <https://orcid.org/0000-0001-9827-7267>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Коэффициент извлечения нефти при разработке нефтяных оторочек остаётся низким по сравнению с традиционными нефтяными залежами, что обусловлено интенсивными прорывами газа из газовой шапки, высокой подвижностью газовой фазы, подтягиванием подошвенной воды и сложностью регулирования процессов вытеснения. В мировой практике разработка таких объектов нередко приводит к увеличению стоимости проекта, поскольку выбор стратегии зачастую определяется не геолого-физическими условиями, а инфраструктурными или экономическими факторами. Новые технологии и комплексный подход к проектированию разработки позволят эффективно осваивать эти трудноизвлекаемые ресурсы. В данной работе выполнено обоснование выбора системы разработки нефтяной оторочки одного из крупных месторождений Северного Каспия, которое на текущей фазе находится на этапе проектирования. Сложное геологическое строение, низкая эффективная мощность и наличие газовой шапки требуют применения индивидуальной системы разработки с использованием горизонтальных скважин и методов поддержания пластового давления.

Методологической основой исследования послужило гидродинамическое моделирование на секторной модели одной из залежей Северного Каспия. В рамках работы проведено сравнение четырёх систем разработки: разработка газовой шапки, только оторочки, последовательная и одновременная добыча

в сочетании с различными системами поддержания давления. По результатам анализа установлено, что наибольшую нефтеотдачу обеспечивает стратегия разработки нефтяной оторочки с комбинированной системой поддержания пластового давления: обратной закачкой 60 % добытого газа и закачкой воды. Предложено оптимальное размещение горизонтальных стволов на $\frac{3}{4}$ высоты от ГНК. Полученные результаты свидетельствуют о достижении коэффициента извлечения нефти, который одновременно обеспечивает выполнение утвержденных показателей и формирует технико-экономически обоснованный уровень рентабельности разработки. Работа представляет практическую ценность при проектировании разработки трудноизвлекаемых запасов на шельфе.

Ключевые слова: нефтяная оторочка, гидродинамическое моделирование, шельф, система разработки, горизонтальные скважины, ППД, коэффициент извлечения нефти

Для цитирования: Белугин А.Д., Зайцев Р. А., Агупов М.А. Обоснование выбора системы разработки массивной нефтяной оторочки крупного шельфового месторождения Северного Каспия // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 4. С. 105–128. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.5>

Благодарности: Авторы выражают благодарность руководству и техническим рецензентам компании ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» и ТОО «ККО» за предоставление разрешения на публикацию данной работы.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 09.08.2025;
одобрена после рецензирования 17.11.2025;
принята к публикации 15.12.2025.

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

Research article

Feasibility study for the choice of the development system for a massive oil rim of a large offshore field in the North of the Caspian sea

Artem D. Belugin^{1*},
Roman A. Zaitsev²,
Mikhail A. Agupov³

^{1,2} Branch of FES LLP (2, Sushchevsky Val St., Moscow, 127055, Russian Federation)

³ Kalamkas-Khazar Operating LLP (12 microdistrict, 74/1, Aktau, 130000, Kazakhstan)

¹ artem.belugin.94@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-8179-7192>

² ZaytsevRoman90@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3845-5030>

³ mikhail.agupov@kalamkas-khazar.kz; <https://orcid.org/0000-0001-9827-7267>

* Corresponding author

- Abstract.** The oil recovery factor in the development of oil rims remains low compared to conventional oil reservoirs, which is attributed to intensive gas breakthroughs from the gas cap, high gas mobility, bottom water encroachment, and the complexity of controlling displacement processes. In global practice, the development of such assets often leads to increased project costs, since the strategy choice is frequently determined not by geological and physical conditions but by infrastructural or economic factors. New technologies and an integrated approach to development planning make it possible to efficiently exploit these hard-to-recover resources. This paper presents the rationale for selecting a development strategy for the oil rim of a one field in the Northern Caspian Sea, which is currently at the design stage. The complex geological structure, low effective thickness, and the presence of a gas cap require the implementation of an individual development system involving horizontal wells and reservoir pressure maintenance strategies. The methodological basis of the study was dynamic simulation using a sector model. Four development strategies were compared: development of the gas cap, oil rim only, sequential and simultaneous production, combined with various pressure maintenance systems. The analysis showed that the highest oil recovery is achieved with the oil rim development strategy that employs a combined reservoir pressure maintenance system: reinjection of 60% of produced gas and water injection. Optimal placement of horizontal wellbores at $\frac{3}{4}$ of the height from the gas-oil contact was proposed. The obtained results may help reduce the risks of gas and water breakthroughs, improve drainage efficiency, and increase cumulative oil production compared to alternative strategies during field commissioning. The study has practical value for planning the development of hard-to-recover reserves on the shelf.
- Keywords:** oil rim, dynamic modeling, offshore, development system, horizontal wells, reservoir pressure maintenance, oil recovery factor
- For citation:** Belugin AD, Zaitsev RA, Agupov MA. Feasibility study for the choice of the development system for a massive oil rim of a large offshore field in the north of the Caspian sea. Science. Innovations. Technologies. 2025;(4):105-128. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.5>
- Acknowledgments:** The authors are grateful to the management and technical reviewers of LUKOIL-Engineering LLC and TOO «KKO» for granting permission to publish this work.
- Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interests.
- The article was submitted 09.08.2025;
approved after reviewing 17.11.2025;
accepted for publication 15.12.2025.

Введение

Разработка трудноизвлекаемых запасов нефти является одним из ключевых направлений развития нефтяной отрасли в условиях истощения традиционных залежей. Особое внимание при этом уделяется залежам с нефтяной оторочкой – тонким нефтяным толщам, залегающим между газовой шапкой и подошвенной водой. Такие объекты характеризуются ограниченной нефтенасыщенной толщиной, высокой подвижностью газовой фазы, рисками ранних прорывов газа и воды, а также сложностями в реализации эффективной системы поддержания пластового давления (ППД). Все это приводит к снижению коэффициента извлечения нефти (КИН), который в среднем в мировой практике составляет 10–15 % для рассматриваемых залежей [1]. Однако разрабатываемые залежи, характеризуемые низкими нефтенасыщенными толщинами, имеют тенденцию к более быстрому расформированию нефтяной оторочки вследствие низкого энергетического потенциала пласта, что ограничивает конечный коэффициент извлечения нефти.

Анализ отечественного и зарубежного опыта разработки аналогичных объектов показывает, что выбор стратегии освоения нефтяной оторочки определяется не только геолого-физическими характеристиками, но и инфраструктурными и экономическими ограничениями [3–9]. Применяемые подходы включают бурение горизонтальных скважин, обратную закачку газа, барьерное и законтурное заводнение, интеллектуальное заканчивание и адаптивные системы управления разработкой. Однако универсального решения для всех условий не существует, что требует индивидуальной оценки каждого месторождения на основе численного моделирования.

Цель исследования – обоснование оптимальной системы разработки нефтяной оторочки месторождения на шельфе Каспия с применением методов гидродинамического моделирования.

Исследуемый объект – крупное шельфовое нефтегазовое месторождение Северного Каспия со средней эффективной толщиной

нефтяной оторочкой 9 м, где на долю оторочки приходится до 28 % суммарных извлекаемых запасов. Сложное геологическое строение, наличие тектонических нарушений и ограниченная инфраструктура обуславливают необходимость заблаговременного подбора стратегии освоения с учётом геологических и экономических неопределённостей [10].

Материалы и методы исследований

Одним из факторов, определяющих выбор системы разработки залежей с нефтяной оторочкой, является соотношение поровых объёмов газовой шапки и нефтяной части пласта, описываемое коэффициентом M , а также эффективная нефтенасыщенная толщина h оторочки. В мировой практике [4–5] данное соотношение используется для первичного скрининга и классификации целесообразности вовлечения нефтяной оторочки в разработку (рис. 1). Коэффициент M рассчитывается по следующему выражению:

$$M = \frac{v_{\text{пор}}^{\text{газ}}}{v_{\text{пор}}^{\text{нефть}}}, \quad (1)$$

где $v_{\text{пор}}^{\text{газ}}$ — поровый объём газовой шапки;
 $v_{\text{пор}}^{\text{нефть}}$ — поровый объём нефтяной оторочки.

Следует отметить, что существует зона неопределённости, возникающая при толщине оторочки от 6 до 12 м. В этом диапазоне существенно возрастают риски неконтролируемого прорыва газа и воды и соответственно выбор системы разработки становится затруднительным. Такие условия требуют более глубокой проработки вариантов освоения объекта на основе численного моделирования и анализа чувствительности к параметрам неопределённости [11–17]. Стоит отметить, что при проектировании разработки шельфовых месторождений одной из ключевых проблем является высокая степень неопределённости, обусловленная ограниченным объемом исходных геолого-геофизических и промысловых данных [18].

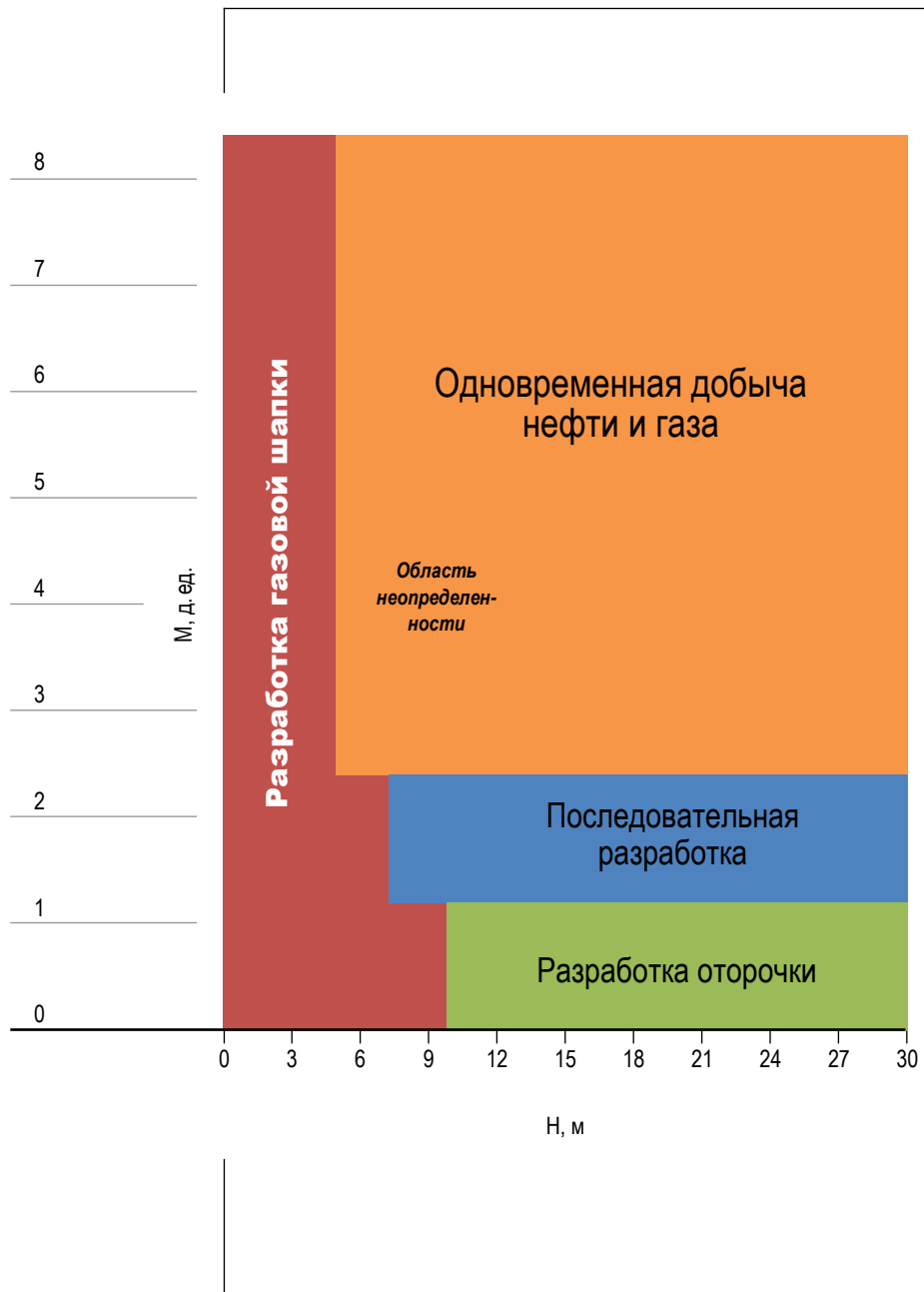


Рис. 1. Неопределенность в выборе системы разработки нефтяной оторочки.

Fig. 1. Uncertainty in the selection of an oil rim development strategy.

Источник: составлено авторами по данным [4–5].

Source: compiled by the authors according to data [4–5].

На основе представленной схемы выделяют четыре основных подхода к разработке залежей с нефтяной оторочкой [5].

1. Разработка газовой шапки на истощении, при которой основное внимание уделяется добыче газа, а нефть из оторочки вовлекается частично или остаётся неосвоенной.
2. Разработка только нефтяной оторочки, без вовлечения газа, с фокусом на стабилизацию пластового давления и предотвращение прорывов газа.
3. Последовательная разработка, при которой вначале разрабатывается нефтяная часть, а затем газовая шапка.
4. Совместная разработка нефти и газа, предусматривающая одновременную эксплуатацию обеих фаз.

Для повышения нефтеотдачи из подобных объектов применяются как традиционные методы разработки месторождений, включая обратную закачку газа, законтурное и барьерное заводнение, так и современные такие как интеллектуальное заканчивание, управляемое горизонтальное бурение, а также технологии, направленные на поддержание равномерного распределения давления и снижение градиентов, способствующих прорывам газа и воды [8–13]. В рамках данной работы оценивается возможность разработки на основе традиционных методов разработки.

Выбор стратегии освоения нефтяной оторочки должен базироваться на комплексной оценке геолого-физических параметров пласта, технико-экономических показателей, а также сценарных расчётах, позволяющих выявить оптимальный режим эксплуатации.

Исследование выполнено на основе поэтапного численного моделирования с применением современного гидродинамического симулятора. К настоящему моменту на месторождении пробурено 5 разведочных скважин, на основе которых построена геологическая и гидродинамическая модели. Тип коллектора – терригенный, пласт характеризуется незначительной вязкостью нефти и средней проницаемостью около 300 мД. Газосодержание пласта составляет

примерно $116 \text{ м}^3/\text{м}^3$, что указывает на значительное влияние газовой фазы на режим добычи.

Все расчёты проводились на секторной модели в сертифицированном программном обеспечении для гидродинамического моделирования. Размеры расчётных блоков: по оси X – 100 м, по оси Y – 100 м, по оси Z – 0,5 м, с локальным измельчением в районе горизонтальных стволов. Модель описывает трёхфазную фильтрацию с учётом капиллярных давлений, относительных проницаемостей и PVT свойств [19].

Методология выбора системы разработки включала четыре взаимосвязанных этапа:

Этап 1. Выбор системы размещения скважин

Первоначально выполнена оценка инфраструктурных ограничений, связанных с особенностями морского размещения ледостойких платформ. Поскольку проект реализуется в условиях ограниченного числа буровых слотов на морской платформе, схема размещения скважин должна учитывать количество доступных слотов для реализации разработки нефтяной оторочки, а также технологические ограничения по кривизне стволов и максимальное допустимое отклонение в плане. На рисунке 2 показано размещение скважин и варианты максимального отхода от платформы: 4 и 6 км от точки размещения платформы. Для разработки нефтяной оторочки в представленной работе выполнены расчёты с использованием 4 горизонтальных стволов и 4 нагнетательных скважин (В зависимости от рассматриваемого сценария).

Этап 2. Определение оптимального размещения скважин по разрезу и стартового дебита

На втором этапе выполнена оптимизация расположения горизонтальных скважин в пределах нефтяной оторочки. В расчётах учитывались вариации глубины залегания горизонтальной скважины [20]. Дополнительно на данном этапе определялся стартовый (или критический) дебит добывающих скважин, при котором обеспечивается устойчивый отбор нефти без риска прорыва газа или воды. Для оценки критических значений использовались

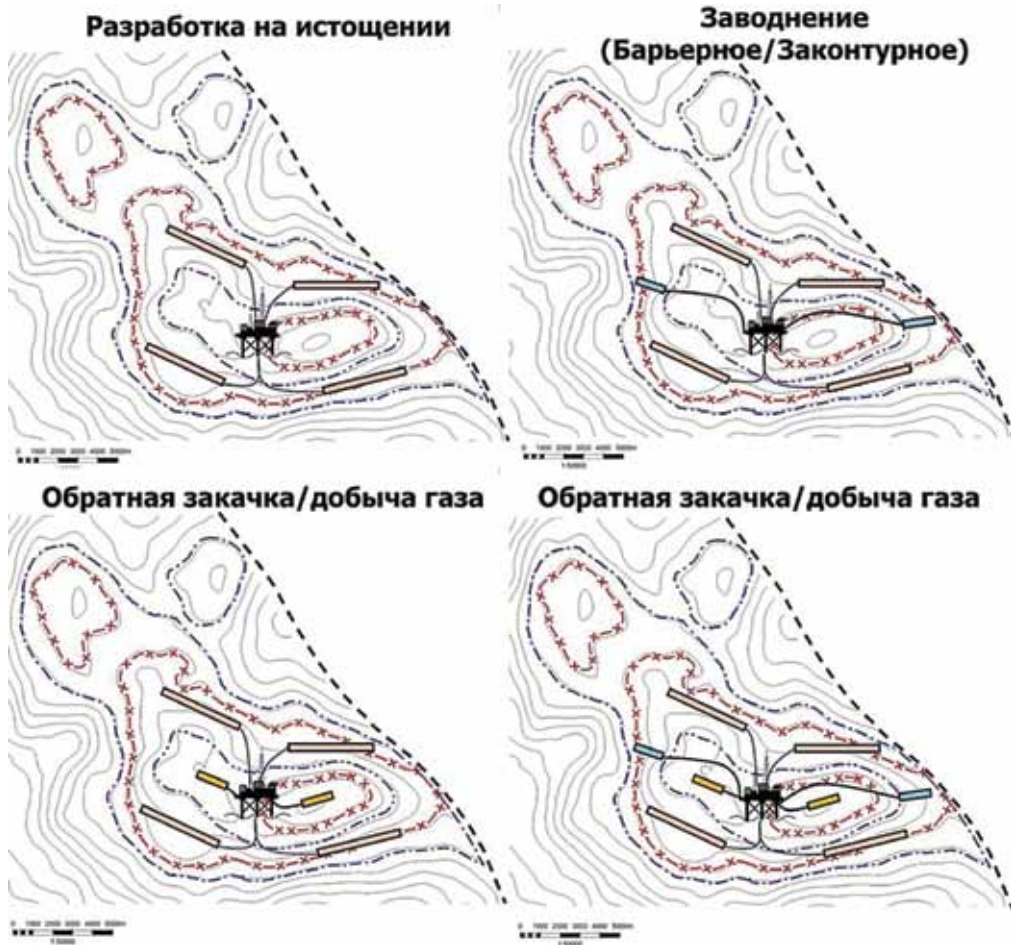


Рис. 2.

Схема размещения проектных скважин в представленной работе.

Fig. 2. Schematic layout of the proposed wells in the present study.

Источник: составлено автором.

Source: compiled by the authors.

как аналитические методы, так и вероятностная оценка на базе численного моделирования, с учётом конкретных геолого-физических характеристик месторождения. Применение аналитических методик для расчёта оптимального режима работы скважин в условиях, осложнённых конусообразованием, не представляется надёжным. Этот вывод подтверждается исследованием [11], в котором выполнено сопоставление критических дебитов, полученных аналитически и в результате численного гидродинамического моделирования.

Этап 3. Оценка чувствительности модели к ключевым параметрам

Для оценки влияния различных геологических и динамических параметров на эффективность разработки проведена серия вероятностных расчетов с использованием модуля «Адаптация и Оптимизация». Методика базируется на варьировании одной переменной при фиксированных остальных, что позволило выделить наиболее чувствительные параметры на показатели разработки [2]. В расчётах использовались: объём газовой шапки, мощность аквифера, анизотропия проницаемости, проводимость тектонических нарушений, а также значения концевых точек фазовых проницаемостей. Все результаты анализа чувствительности агрегированы в виде торнадо-диаграммы, демонстрирующей относительное влияние факторов на технологические показатели.

Этап 4. Расчёт прогнозных вариантов разработки

Финальным этапом исследования стал расчёт серии прогнозных вариантов разработки нефтяной оторочки. Во всех вариантах учитывались инфраструктурные ограничения проекта по максимальному суточному объёму добычи газа и нефти, предельный газовый фактор – $12\,000\text{ м}^3/\text{м}^3$, предельная обводненность – 0,98 д.ед.

Период прогноза – 38 лет. Для каждого варианта оценивались ключевые технологические показатели (накопленная добыча, уровни обводнённости и газового фактора, КИН). Также выполнена оценка оптимальных объёмов закачки газа и воды в условиях рассматриваемой сетки скважин.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ чувствительности, выполненный с использованием гидродинамической модели, позволил количественно оценить влияние неопределённостей ключевых геолого-физических параметров на накопленную добычу жидкости и эффективность разработки. Выявлено, что наибольшее влияние на продуктивность системы оказывают параметры, определяющие энергетическое состояние пласта и условия фильтрации (рис. 3).

Вариативность параметров неопределенности обоснована по результатам фактических экспериментов на керновых данных месторождения, а также по результатам создания собственной геологической модели для подсчета запасов и анализа неопределенностей, основанной на подтвержденных данных и обоснованных решениях.

Неопределенность точного положения контактов зависит от двух факторов. Во-первых, пробуренные скважины приурочены к сводам поднятий, что приводит к очень немногим вскрытиям ВНК. Во-вторых, в пределах поднятия имеется невскрытая бурением структура, а скважина вскрыла меньшую из двух структур поднятия.

Для оценки добычного потенциала и уточнения свойств нефтяной оторочки предлагается бурение двух пилотных добывающих горизонтальных скважин с целью проведения опытно-промышленных работ.

Изменение объёма газовой шапки приводит к изменению прогнозной добычи на +66,7%, в то время как снижение мощности аквифера уменьшает добычу на 35,4%. Существенное влияние также оказывают тектонические нарушения (- 34%), приводящие к росту риска прорыва газа в добывающие скважины. Анизотропия проницаемости (-39,7 %) и снижение абсолютной проницаемости (- 29%) ограничивают эффективность дренирования, формируя локальные застойные зоны. Параметры относительных фазовых проницаемостей (концевые точки) оказывают влияние в диапазоне от -27% до +12%, определяя подвижность фаз и эффективность вытеснения нефти.

Переходя к оценке сценариев разработки нефтяной части, отметим, что в сценарии разработки газовой шапки акцент сделан на добыче и последующей монетизации газа, с объёмом отбора до

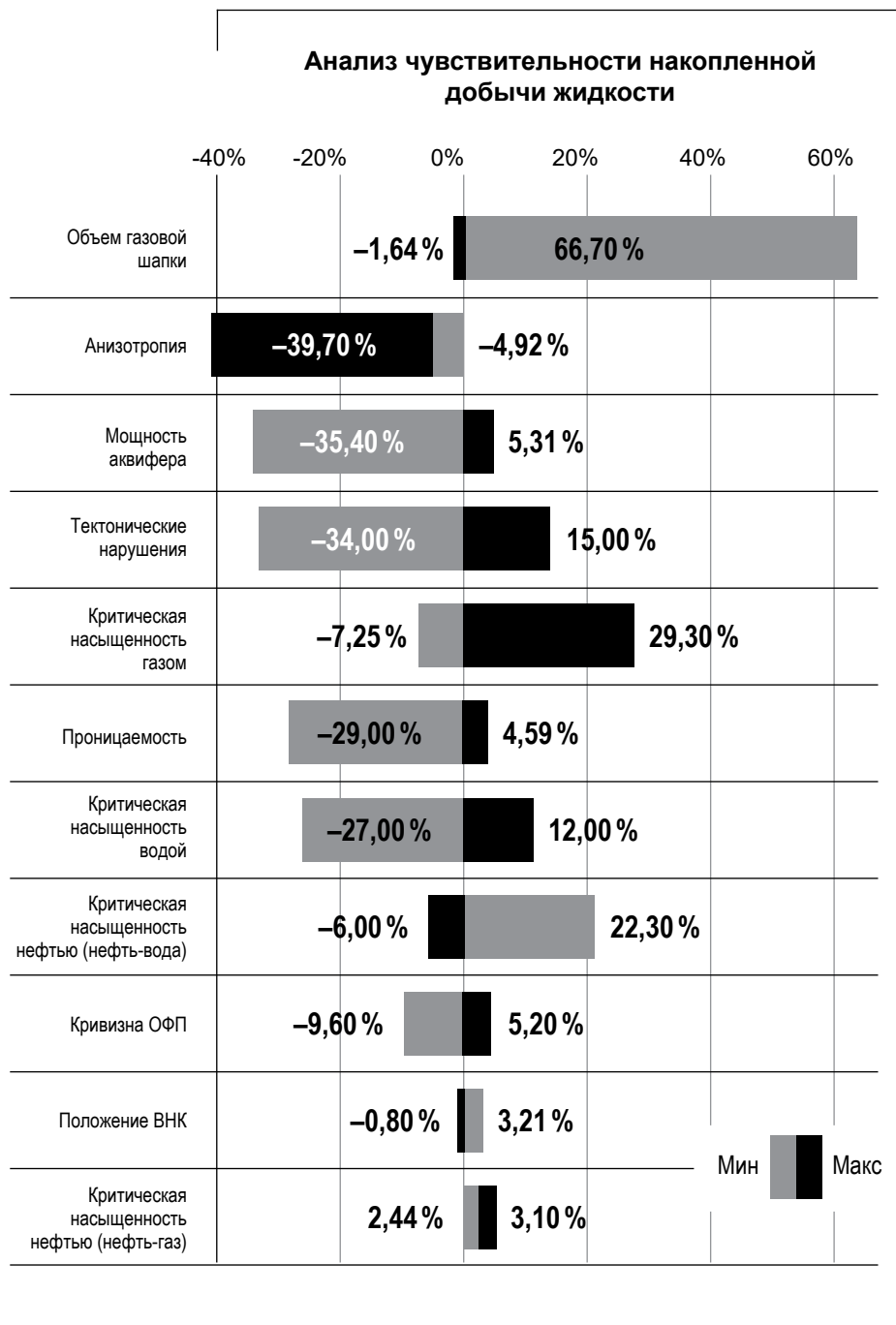


Рис. 3. Результаты оценки неопределенностей на технологические показатели разработки.

Fig. 3. Results of uncertainty assessment on field development performance indicators.

Источник: составлено автором / Source: compiled by the authors.

1500 тыс. м³/сут, что позволит достигнуть годового уровня реализации около 500 млн м³. По мере истощения газовой шапки происходит подъём газонефтяного контакта, что приводит к процессу расформированию нефтяной оторочки и перетоку запасов нефти в газонасыщенную зону [17]. Это обусловлено интенсивным снижением пластового давления (с 18,1 до 15,2 МПа) и высокой подвижностью газа. Оценено, что за период прогноза 7 млн т нефти переходит выше ГНК и становится неизвлекаемой (рис. 4). Эффективность этого сценария определяется величиной NPV и, в частности, ценой реализации газа.

В сценарии разработки только нефтяной оторочки, при рассчитанном оптимальном размещении горизонтальных стволов на уровне $\frac{3}{4}$ высоты оторочки от ГНК (отметка 1675 м), обеспечивается более равномерное дренирование нефтенасыщенного интервала. Моделирование показало, что стабильный приток нефти возможен только при низкой депрессии, позволяющей избежать прорыва газа и воды. Для стабилизации давления рассмотрены варианты с ППД — обратная закачка газа, заводнение и их комбинации.

Анализ вариантов обратной закачки газа показал, что при уровне закачки более 70 % от добываемого газа наблюдается более интенсивный прорыв газа к забоям скважин, а при уровне менее 60 % — компенсация оказывается недостаточной. Наилучшие результаты достигаются при обратной закачке 60 % объема от добытого газа, оставшуюся часть предлагается монетизировать (рис. 5).

Аналогично, при закачке воды оптимальным объёмом является 2500 м³/сут на скважину.

Сценарий одновременной разработки газа и нефти характеризуется конфликтом режимов: интенсивная добыча газа вызывает ускоренное снижение пластового давления, что приводит к ухудшению условий вытеснения нефти. Это проявляется уже в первые 5 лет разработки — снижение давления достигает 10 %, что отражается на уменьшении дебита и увеличении газового фактора.

В варианте последовательной разработки, при которой на первом этапе ведётся отбор нефти, а затем газа, наблюдается более стабильное поведение системы. Однако переход между режимами разработки вызывает значительное изменение пластового давления,

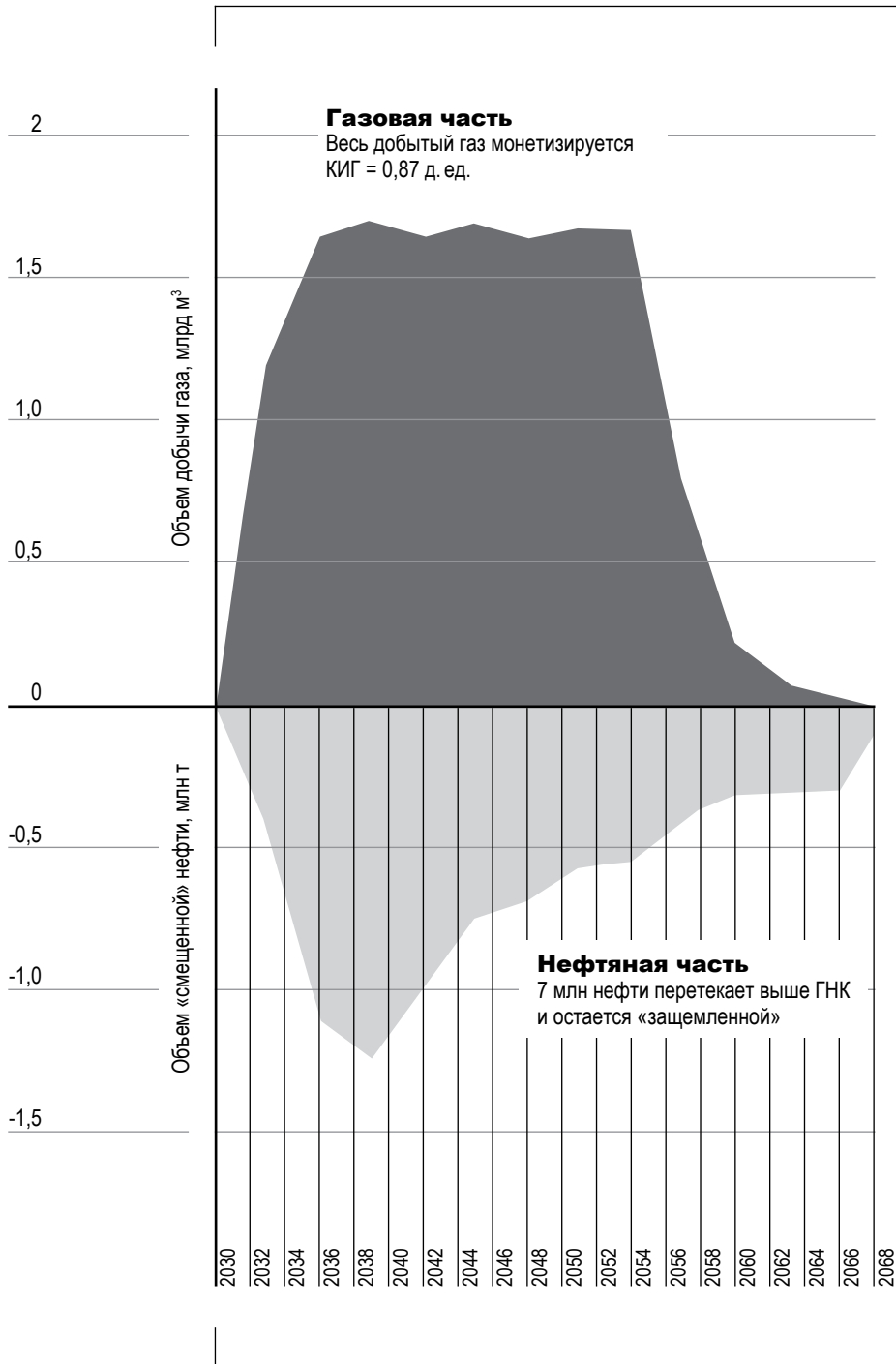


Рис. 4.

Оценка расформирования нефтяной оторочки.

Fig. 4. Assessment of oil rim depletion and breakdown

Источник: составлено автором / Source: compiled by the authors.

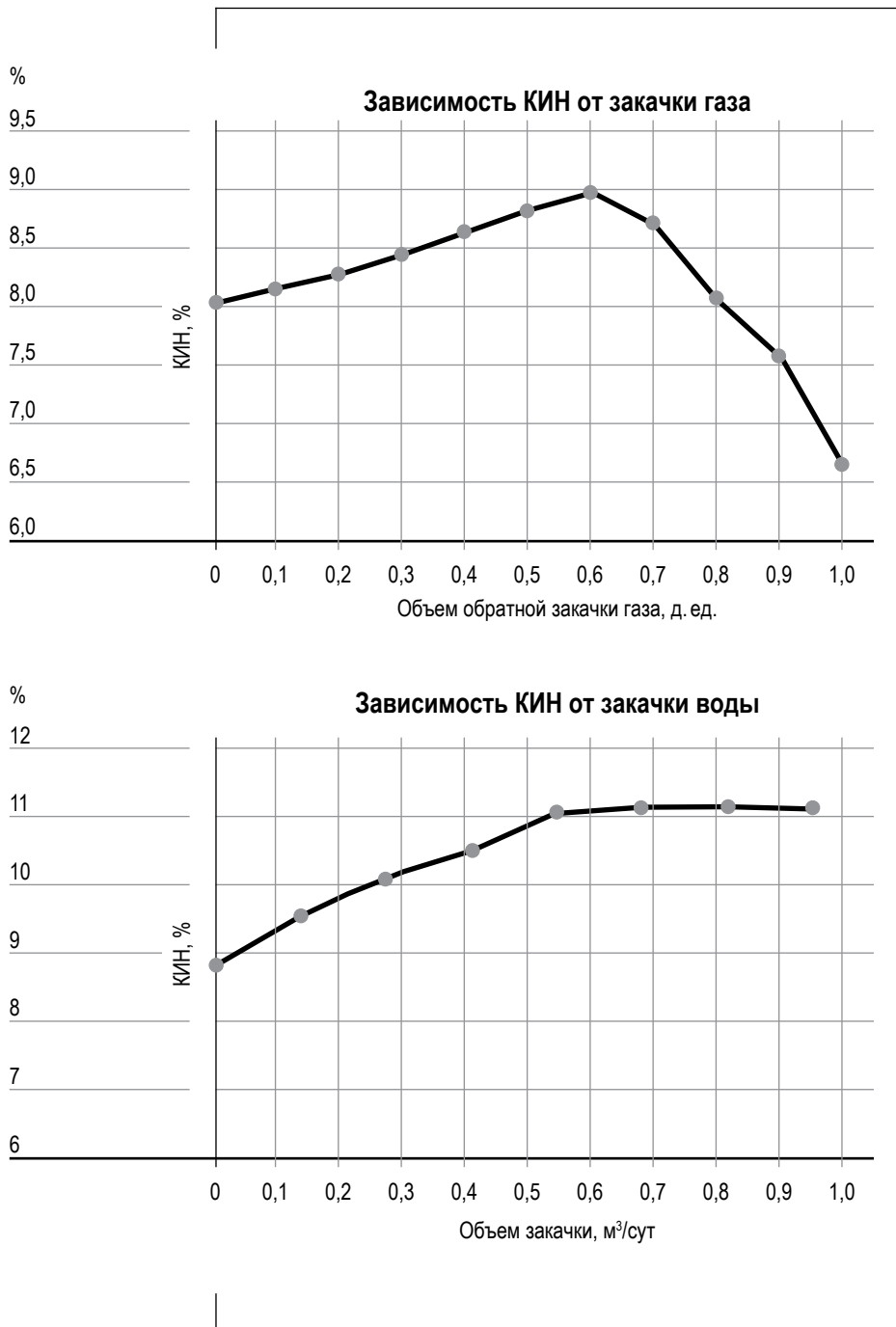


Рис. 5.

Анализ влияния объемов закачки на КИН

Fig. 5. Analysis of the impact of injection volumes on oil recovery factor.

Источник: составлено автором / Source: compiled by the authors.

что затрудняет эффективную реализацию второго этапа и сопровождается технологическими рисками, в том числе – вмешательством подошвенной воды.

Дополнительное применение ППД частично компенсирует снижение давления, однако при параллельной добыче нефти и газа объёмы закачки оказываются недостаточными для эффективного управления энергетическим состоянием пласта.

Оптимальной, с точки зрения технологических параметров, является система разработки нефтяной оторочки с комбинированным поддержанием пластового давления. Применение обратной закачки газа в объеме 60 % от суммарной добычи и закачка воды позволили достичь максимального КИН – 15,6%. В таблице 1 представлено сравнение результатов расчетов.

Наиболее низкие значения КИН зафиксированы при разработке на истощении и одновременном отборе газа и нефти. Это согласуется с ранее опубликованными результатами исследований для оторочек с коэффициентом $M > 1,5$ и толщиной менее 10 м [4, 5], где даже незначительное нарушение равновесия приводит к миграции газа в зону притока. Варианты с последовательной разработкой также подвержены резкому изменению давления, особенно на границе перехода между фазами. Несмотря на более высокие значения КИН (до 11,2% при заводнении), этот подход связан с технологической сложностью реализации, рисками обводнения и необходимостью переоснащения системы ППД на втором этапе.

Расчёты показали, что вовлечение газа из газовой шапки на ранних этапах разработки негативно сказывается на конечной нефтеотдаче. На первой фазе освоения целесообразно рассматривать нефть в качестве приоритетного флюида.

Дальнейшая оценка потенциала нефтеотдачи предполагает исследование влияния технологии добычи, а именно интеллектуального заканчивания, как одного из перспективных методов добычи нефти из залежей с нефтяной оторочкой.

Таблица 1. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАССЧИТАННЫХ ВАРИАНТОВ РАЗРАБОТКИ
Table 1. Comparative performance of the evaluated development scenarios

№ Система разработки	Закачиваемый флюид	Кол-во скважин, шт (доб./нагн.)	КИН, %
1 Газовая шапка (разработка на истощении)	Нет	2/0	—
2 Только нефтяная оторочка	Нет	4/0	11.8
3 Нефтяная оторочка + закачка воды	Вода	4/2	12.9
4 Нефтяная оторочка + обратная закачка газа (60%)	Газ (60%)	4/2	11.8
5 Нефтяная оторочка + закачка воды + закачка газа (60%)	Вода + газ	4/4	15.6
6 Одновременная разработка нефти и газа	Нет	4/2	8.1
7 Одновременная разработка нефти и газа + закачка воды	Вода	4/4	10.1
8 Последовательная разработка нефти и газа	Нет	4/2	9.0
9 Последовательная разработка + закачка воды	Вода	4/4	11.2

Источник: составлено автором / Source: compiled by the authors.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что эффективность разработки нефтяных оторочек на шельфовых месторождениях Северного Каспия существенно зависит от выбора стратегии эксплуатации и системы поддержания пластового давления, а также конкретных геолого-физических характеристик. В ходе проведенного исследования выявлены ключевые направления и меры, способствующие повышению эффективности разработки месторождения:

1. Проектирование эффективной системы поддержания пластового давления еще на ранних этапах позволяет увеличить накопленную добычу нефти на 20% по сравнению с вариантом разработки на истощение.
2. Оптимальным размещением стволов по разрезу залежи является абсолютная отметка на $\frac{3}{4}$ высоты оторочки от ГНК.
3. Объем компенсации отбираемого газа является ключевым фактором, влияющим на эффективность эксплуатации скважин. Оптимальный объем закачки в условиях рассмотренной схемы размещения скважин равен 60% от добываемого газа.
4. Отбор газа газовой шапки из оторочки негативно сказывается на конечной нефтеотдаче, на первой фазе освоения целевым продуктом является нефть.

Список источников

1. Жданов С. А., Максимов М. М., Хавкин А. Я. и др. Проектирование разработки нефтяных месторождений с использованием постоянно действующих геолого-технологических моделей // Нефтяное хозяйство. 1997. № 3. С. 43–47.

2. Балин Д. В., Балина О. В., Мамчистова Е. И. Подход к получению вероятностной оценки прогнозных профилей добычи, конденсатогазового фактора и обводнения // Наука. Инновации. Технологии. 2024. № 3. С. 139–156. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.3.7>
3. Гавура В. Е. Геология и разработка нефтяных и газонефтяных месторождений. М.: ВНИИОЭНГ, 1995. 496 с.
4. Alokla K., Maalouf E., Ghorayeb K. Optimization guideline for thin oil rim reservoir development. Paper presented at: SEG/AAPG International Meeting for Applied Geoscience & Energy; Houston, Texas, August 2024. P. 2696. <https://doi.org/10.1190/image2024-4100200.1>
5. John I. J., Matemilola S., Lawal K. Simple guidelines for screening development options for oil-rim reservoirs. Paper presented at: SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition; Lagos, Nigeria, August 2019. P. 15. <https://doi.org/10.2118/198718-MS>
6. Latief A. I., Syofyan S., Romanov I., Valerio R. L., Shabibi T. A. A strategic approach to address challenge of complex-thin oil rim development. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference; 2019. SPE-197385-MS. 26 P. <https://doi.org/10.2118/197385-MS>
7. Zolotukhin A. A., Salikhov M. R. Selection of the best development scenario for the thin oil rim with reservoir pressure maintenance system involving gas injection into the gas cap: Case study: West Masssoyakha PK 1-3 Horizon. SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition; 2016. SPE-181917-MS. 17 P. <https://doi.org/10.2118/181917-MS>
8. Komin M., Magdeyev I., Schulze-Riegert R., Mukminov I. Multivariate asset assessment: Fast and reasonable decision on oil rims development on the example of a unique field in the Arctic onshore. SPE Russian Petroleum Technology Conference; Moscow, Russia, 2018. SPE-191612-18RPTC-MS. 16 P. <https://doi.org/10.2118/191612-MS>
9. Triandi M., Chigbo I., Khunmek T., Ismail I. M. Field case: Use of autonomous inflow control devices to increase oil production in a thin oil rim reservoir in the Gulf of Thailand. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference; Abu Dhabi, UAE, 2018. SPE-193305-MS. 12 P. <https://doi.org/10.2118/193305-MS>

10. Глумов И. Ф. [и др.] Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря / И. Ф. Глумов, Я. П. Маловицкий, А. А. Новиков, Б. В. Сенин. М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. 342 с.: ил. ISBN 5-8365-0184-X.
11. Кряжев В. А. [и др.] Методика подбора режима разработки нефтегазоконденсатной залежи с помощью гидродинамического моделирования / В.А. Кряжев, Я. А. Кряжев, А. Я. Гильманов, А. П. Шевелев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 9. С. 137–147.
12. Кулеш В. А., Исламов Р. Р. Определение критического безгазового дебита нефтяных скважин при помощи гидродинамического моделирования // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 5. С. 58–62. <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2023-5-58-62>
13. Зайцев Р. А., Мартюшев Д. А. Обоснование оптимального типа профиля заканчивания скважин на основе ретроспективной оценки технико-экономических показателей эксплуатации // Георесурсы. 2023. №25 (1). С. 119–129. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.1.12>
14. El Gazar A., Bin Sumaida S. A., Alklich M. Y., Al Shabibi T. A., et al. Optimizing oil development of a super K compartmentalized reservoir with large gas cap and bottom water aquifer: Case study. Paper presented at: Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference; 2015 Nov; Abu Dhabi, UAE. SPE-177575-MS. <https://doi.org/10.2118/177575-MS>
15. Гавура А. В., Кашников К. А., Никифоров В. П. К определению извлекаемых запасов нефти нефтегазовой залежи (нефтяной оторочки) по промысловым данным // Нефтепромысловое дело. 2019. № 12(612). С. 5–8. [https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-12\(612\)-5-8](https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-12(612)-5-8)
16. Мамедов Э. А. Глобальные деформации флюидальных контактов до и в процессе разработки месторождений нефти и газа: дис. ... канд. техн. наук. Москва: Институт проблем нефти и газа, 2007. 133 с.
17. Северов А. Я. Повышение эффективности разработки нефтяных месторождений при наличии явлений конусообразования: дис. ... канд. техн. наук. Москва: Институт проблем нефти и газа, 2006. 158 с.
18. Тасмуханова А. Е., Шигапова Р. Р. Особенности разработки шельфовых месторождений нефти // Вестник Евразий-

ской науки. 2018. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razrabotki-shelfovyh-mestorozhdeniy-nefti> (дата обращения: 05.06.2025).

19. Белугин А. Д. [и др.] Разработка алгоритма расчета компонентоотдачи для совершенствования разработки шельфовых нефтегазовых месторождений Северного Каспия / А. Д. Белугин, И. Д. Магдеев, А. В. Чупеев, И. А. Грицай // Нефтегазовое дело. 2024. Т. 22. № 3. С. 19–29. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-3-19-29>
20. Зайцев Р. А., Распопов А. В. Опыт разработки месторождений Пермского края горизонтальными скважинами // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2020. Т. 20, № 2. С. 182–191. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2020.2.8>

References

1. Zhdanov SA, Maksimov MM, Khavkin AY et al. Designing the development of oil fields using geological and technological models. Oil Industry. 1997;(3):43-47.
2. Balin DV, Balina OV, Mamchistova EI. An approach to forecast production profiles, oil-gas ratio and water contamination probabilistic assessment. Science. Innovations. Technologies. 2024;(3):139-156. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2024.3.7> (In Russ.).
3. Gavura VE. Geology and development of oil and gas fields. Moscow: VNIOENG; 1995. 496 p. (In Russ.).
4. Alokla K, Maalouf E, Ghorayeb K. Optimization guideline for thin oil rim reservoir development. Paper presented at: SEG/AAPG International Meeting for Applied Geoscience & Energy; Houston, Texas; August 2024. <https://doi.org/10.1190/image2024-4100200.1>
5. John IJ, Matemilola S, Lawal K. Simple guidelines for screening development options for oil-rim reservoirs. Paper presented at: SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition; Lagos, Nigeria; August 2019. <https://doi.org/10.2118/198718-MS>
6. Latief AI, Syofyan S, Romanov I, Valerio RL, Shabibi TA. A strategic approach to address challenge of complex-thin oil rim development. Abu Dhabi International Petroleum Exhibi-

- tion & Conference; 2019. SPE-197385-MS. 26 p. <https://doi.org/10.2118/197385-MS>
7. Zolotukhin AA, Salikhov MR. Selection of the best development scenario for the thin oil rim with reservoir pressure maintenance system involving gas injection into the gas cap: Case study: West Masssoyakha PK 1-3 Horizon. SPE Russian Petroleum Technology Conference and Exhibition; 2016. SPE-181917-MS. 17 P. <https://doi.org/10.2118/181917-MS>
 8. Komin M, Magdeyev I, Schulze-Riegert R, Mukminov I. Multivariate asset assessment: Fast and reasonable decision on oil rims development on the example of a unique field in the Arctic onshore. SPE Russian Petroleum Technology Conference; Moscow, Russia, 2018. SPE-191612-18RPTC-MS. 16 P. <https://doi.org/10.2118/191612-MS>
 9. Triandi M, Chigbo I, Khunmek T, Ismail IM. Field case: Use of autonomous inflow control devices to increase oil production in a thin oil rim reservoir in the Gulf of Thailand. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference; Abu Dhabi, UAE; 2018. SPE-193305-MS. 12 P. <https://doi.org/10.2118/193305-MS>
 10. Glumov IF, Malovitsky YP, Novikov AA, Senin BV. Regional geology and hydrocarbon potential of the Caspian Sea. Moscow: Nedra-Businesscenter; 2004. 342 p.: ill. ISBN 5-8365-0184-X (In Russ.).
 11. Kryazhev VA, Kryazhev YA, Gilmanov YA, Shevelev AP. Method for selecting development mode of an oil and gas condensate reservoir using hydrodynamic modeling. *Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Engineering of Georesources*. 2022;333(9):137-147. (In Russ.).
 12. Kulesh VA, Islamov RR. Determination of critical gas-free production rate of oil wells using hydrodynamic modeling. *Ekspozitsiya Neft Gas*. 2023;5:58-62. <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2023-5-58-62> (In Russ.).
 13. Zaytsev RA, Martyushev DA. Justification of the optimal type of well completion profile based on retrospective evaluation of techno-economic performance. *Georesursy*. 2023;25(1):119-129. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.1.12> (In Russ.)
 14. El Gazar A, Bin Sumaida SA, Alklich MY, Al Shabibi TA, et al. Optimizing oil development of a super K compartmentalized reservoir with large gas cap and bottom water aquifer: Case study. Paper presented at: Abu Dhabi International Petroleum

- Exhibition & Conference; November 2015; Abu Dhabi, UAE. SPE-177575-MS. <https://doi.org/10.2118/177575-MS>
15. Gavura AV, Kashnikov KA, Nikiforov VP. Determination of recoverable oil reserves of an oil and gas deposit (oil rim) based on field data. *Neftepromyslovoe delo Oilfield Engineering*. 2019;12(612):5-8. [https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-12\(612\)-5-8](https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-12(612)-5-8) (In Russ.).
 16. Mamedov EA. Global deformations of fluid contacts before and during oil and gas field development: dissertation of cand. tech. sciences. Moscow: Institute of Oil and Gas Problems; 2007. 133 p. (In Russ.).
 17. Severov AY. Improving oil field development efficiency in the presence of coning phenomena: dissertation of cand. techn. sciences. Moscow: Institute of Oil and Gas Problems; 2006. 158 p. (In Russ.).
 18. Tasmukhanova AE, Shigapova RR. Features of offshore oil fields development. *Vestnik Evraziyskoy Nauki Eurasian Science Bulletin*. 2018;2. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razrabotki-shelfovyh-mestorozhdeniy-nefti> [Accessed 05 June 2025] (In Russ.).
 19. Belugin AD, Magdeev ID, Chupeev AV, Gritsai IA. Development of algorithm for component recovery calculation to optimize offshore oil and gas fields development of the North Caspian. *Oil and Gas Business*. 2024;22(3):19-29. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2024-3-19-29> (In Russ.).
 20. Zaytsev RA, Raspopov AV. Experience in development of Perm region fields using horizontal wells. *Vestnik Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and Gas and Mining*. 2020;20(2):182-191. <https://doi.org/10.15593/2224-9923/2020.2.8> (In Russ.).

Информация об авторах

Белугин Артём Дмитриевич – инженер 2-й категории направления разработки, Филиал ТОО «Форвард Энерджи Солюшнс», Москва, Россия. Researcher ID: OGN-0500-2025

Зайцев Роман Александрович – руководитель направления разработки, Филиал ТОО «Форвард Энерджи Солюшнс», Москва, Россия, Researcher ID: ABA-6983-2022

Агунов Михаил Андреевич – Менеджер интегрированного моделирования, Департамент геологии и разработки ТОО «Kalamkas-Khazar Operating», Актау, Казахстан, Researcher ID: OGO-8616-202

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

Information about the authors

Artem D. Belugin – Engineer 2nd Category of Development Department, Branch of LLP Forward Energy Solutions, Moscow, Russia. Researcher ID: OGN-0500-2025

Roman A. Zaitsev – Head of Development Department, Branch of LLP Forward Energy Solutions, Moscow, Russia. Researcher ID: ABA-6983-2022

Mikhail A. Agupov – Integrated Modelling Manager of ТОО «Kalamkas-Khazar Operating», Aktau, Kazakhstan, Researcher ID: OGO-8616-202

Author contributions: the authors contributed equally to this article.



Научная статья
УДК 622.279
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.6>

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ УЗЛОВОГО И ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА ПРИ ИНТЕГРИРОВАННОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

Виктория Владимировна Вержбицкая

Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)
vvchernova@ncfu.ru; <https://orcid.org/0009-0001-8169-6921>

Аннотация.

Современное развитие крупных нефтегазодобывающих компаний требует активного применения разнообразных методов интегрированного проектирования, направленных на повышение эффективности процессов добычи углеводородов. Методы системного анализа вносят значительный вклад в оптимизацию технологических режимов работы эксплуатационных скважин, как на газовых, так и на нефтяных месторождениях.

Использование интегрированного проектирования в разработке нефтяных и газовых месторождений существенно повышает качество принятия решений на всех ключевых этапах, включая выбор технологического режима и определение оптимальных геолого-технологических мероприятий. Интегрированное моделирование способствует комплексной оптимизации процессов эксплуатации скважин с учетом наземной инфраструктуры, связанной с обустройством месторождений. В современной нефтегазовой отрасли интегрированное моделирование стало ключевым элементом при проектировании и управлении разработкой нефтяных и газовых месторождений.

В статье предлагается подход к определению причин изменения дебита за счет влияющих факторов. Рассмотрены методологии проведения и сопоставление результативности двух методов системного анализа как элементов интегрированного проектирования разработки месторождений нефти и газа (узлового анализа (Nodal Analysis) и детерминированного факторного анализа) для системы «пласт-скважина-штуцер-шлейф». В целом рассматриваемая задача

заклучалась в изучении факторов, влияющих на поток газа из пласта до сепаратора. В каждом из вышеуказанных звеньев системы происходит потеря давления, зависящая от гидравлического сопротивления соответствующего звена. Изменение хотя бы в одном из этих узлов влияет на производительность скважины, чтобы исследовать поведение скважины, все ее компоненты следует рассматривать как единую систему.

Ключевые слова: пласт, скважина, штуцер, шлейф, система уравнений, интегрированное проектирование разработки месторождений, методы системного анализа, узловый анализ, детерминированный факторный анализ, технологические режимы работы скважин

Для цитирования: Вержбицкая В.В. Сравнение результативности узлового и факторного анализа при интегрированном проектировании разработки месторождений // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 4. С. 129–150. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.6>

Благодарности: автор выражает благодарность за научные консультации и советы кандидатам технических наук А.И. Щекину, А. В. Хандзелю.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 30.06.2025;
одобрена после рецензирования 10.12.2025;
принята к публикации 15.12.2025.

2.8.4. Development and Operation of Oil and Gas Fields Research article

Comparison of the performance of nodal and factor analysis in integrated design of oil and gas field development

Victoria V. Verzhbitskaya

North-Caucasus Federal University (1, Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation)
vvchernova@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1884-2313>

Abstract. Modern development of large oil and gas producing companies requires active use of a variety of integrated design methods

aimed at improving the efficiency of hydrocarbon production processes. System analysis methods make a significant contribution to the optimization of production well operating modes in both gas and oil fields.

The use of integrated design in oil and gas field development significantly improves the quality of decision-making at all key stages, including selecting process modes and determining optimal well interventions. Integrated modeling facilitates the comprehensive optimization of well operations, taking into account the surface infrastructure associated with field development. In modern oil and gas industry, integrated modeling has become the key element in design and management of oil and gas field development.

The study proposes an approach to determining the causes of flow rate variations due to influencing factors. It examines the methodologies and compares the performance of two system analysis methods as elements of integrated oil and gas field development design (nodal analysis and deterministic factor analysis) for the reservoir-wellbore-choke-flowline system. The overall objective was to study the factors influencing gas flow from the reservoir to the separator. Each of the above-mentioned system components experiences a pressure loss, which depends on the hydraulic resistance of the corresponding component. A change in even one of these components affects well productivity. In order to understand well performance all components should be considered as a single system.

Keywords: reservoir, well, choke, flow line, system of equations, integrated field development design, system analysis methods, nodal analysis, deterministic factor analysis, technological regime of well operation

For citation: Verzhbitskaya VV. Comparison of the performance of nodal and factor analysis in integrated design of oil and gas field development. Science. Innovations. Technologies. 2025;(4): 129-150. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.6>

Acknowledgments: The author expresses gratitude for scientific consultations and advice to candidates of technical sciences A.I. Shchekin and A.V. Handzel.

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

The article was submitted 30.06.2025;
approved after reviewing 10.12.2025;
accepted for publication 15.12.2025.

Введение

Раннее считалось, что для прогнозирования разработки месторождения необходимым условием является только построение детальной гидродинамической модели залежи с проведением расчетов вариантов разработки и определением технико-экономических показателей (традиционный подход проектирования). Вместе с тем для решения большого круга задач нефтегазового инжиниринга необходимо учитывать все технологические процессы при движении углеводородов из пласта через скважину на поверхность. Данный подход известен как интегрированное проектирование.

Согласно [1], применение традиционного подхода к проектированию и анализу технологических показателей сопряжено со следующими проблемами:

- все модели, находящиеся в технологической цепочке за моделью пласта, являются статическими (описывающие состояние лишь в один единственный момент времени в период эксплуатации месторождения, а для анализа в другой момент времени необходимо заново настраивать эти модели);
- такие модели не могут учитывать динамический характер при планировании разработки месторождения.

Недостатки традиционного подхода к проектированию месторождений могут привести к снижению точности планирования показателей, неоправданному бурению и в конечном итоге к низкой экономической эффективности.

Одним из основных методов, способным уменьшить влияние вышерассмотренных проблем, является применение интегрированного подхода к проектированию технологических процессов добычи углеводородного сырья. Интегрированное проектирование (моделирование) – процесс, объединяющий все ключевые дисциплины актива/месторождения (геология, разработка, бурение и закачивание, нефтегазодобыча, обустройство, экономика, экология, анализ рисков) с целью эффективного бизнес-планирования процессов разведки, разработки и эксплуатации месторождения [2]. Основ-

ным преимуществом интегрированного подхода является объединение всех составных разделов проектирования, включающих технические, экономические, экологические и организационные факторы. Интегрированное моделирование позволяет комплексно оптимизировать процессы эксплуатации скважин с учетом наземной инфраструктуры обустройства месторождений.

Материалы и методы исследований

В настоящее время в нефтегазодобывающих компаниях интегрированное проектирование разработки нефтяных и газовых месторождений является неотъемлемой частью процессов проектирования и регулирования разработки месторождений нефти и газа для оптимизации процессов добычи углеводородов, обеспечивая максимальный экономический эффект при минимальных затратах ресурсов и рисках [3, 4, 5]. Данный метод получил широкое распространение благодаря следующим преимуществам: увеличение коэффициента извлечения нефти, оптимизация капиталовложений, управление рисками, экологическая устойчивость, повышение эффективности управления проектами.

Наряду с вышесказанным применение интегрированного проектирования при разработке нефтяных и газовых месторождений дает возможность значительно повысить качество процесса принятия решений на всех ответственных этапах, таких как выбор технологического режима эксплуатации скважин, подбор оптимальных геолого-технологических мероприятий и т. д.

Неотъемлемым элементом интегрированного проектирования является системный «узловой анализ» (Nodal Analysis) [6, 7], который рассматривает отдельные элементы производственного процесса движения углеводородов из пласта через скважину на поверхность как единую систему.

Результаты исследований и их обсуждение

1. Системный узловой анализ

Использование системного анализа для проектирования системы добычи углеводородов было впервые предложено Гилбертом У.Э. в 1954 г. [8, 9].

Технологический процесс добычи нефти и газа представляет собой сложную цепочку различных производственных этапов, включающих: приток к скважине, поток по скважине, через штуцер и выкидную линию, в трубопроводе и т.д. В ходе этого процесса давление жидкости или газа снижается от пластового давления до давления на входе в сепаратор в результате его потерь. Величина этих отдельных потерь давления связано с влиянием различных факторов, происходящих в пласте, призабойной зоне, внутрискважинном и наземном оборудовании. Для анализа необходимо понимать взаимодействие этих различных факторов.

Согласно узловому анализу, для исследования таких сложных объектов отдельные компоненты всей системы можно рассматривать как элементы единой системы, соединенные в узлах (узловые точки) (рис. 1).

Узловой анализ предусматривает разделение технологических процессов на две подсистемы, которые соединяются в узловой точке. В первой подсистеме анализируются параметры притока из пласта к заданной узловой точке, при этом учитываются возможные потери давления. Вторая подсистема описывает процесс оттока флюида на участке от заданной узловой точки вверх по стволу скважины до сепаратора. В качестве узловой точки зачастую выбирают местоположение на забое или устье скважины. Чаще всего в промысловой практике узловую точку располагают непосредственно в колонне насосно-компрессорных труб в середине работающего интервала перфорации. В данном случае кривая притока характеризует поток из пласта через конструкцию забоя скважины в колонну насосно-компрессорных труб, а кривая оттока (подъема) – параметры потока от узловой точки по стволу скважины, через устье и шлейф к сепаратору. Если давление на сепараторе известно можно определить потери давления на участке от забоя скважины до сепаратора.

Методология узлового анализа предусматривает построение графика с двумя кривыми в координатах «давление – дебит». Для подсистемы «пласт – узловая точка» строится кривая притока, а для участка «сепаратор – узловая точка» – кривая оттока. В результате построения две независимые кривые пересекаются в рабочей точке, в которой дебит и давление для этих кривых равны.

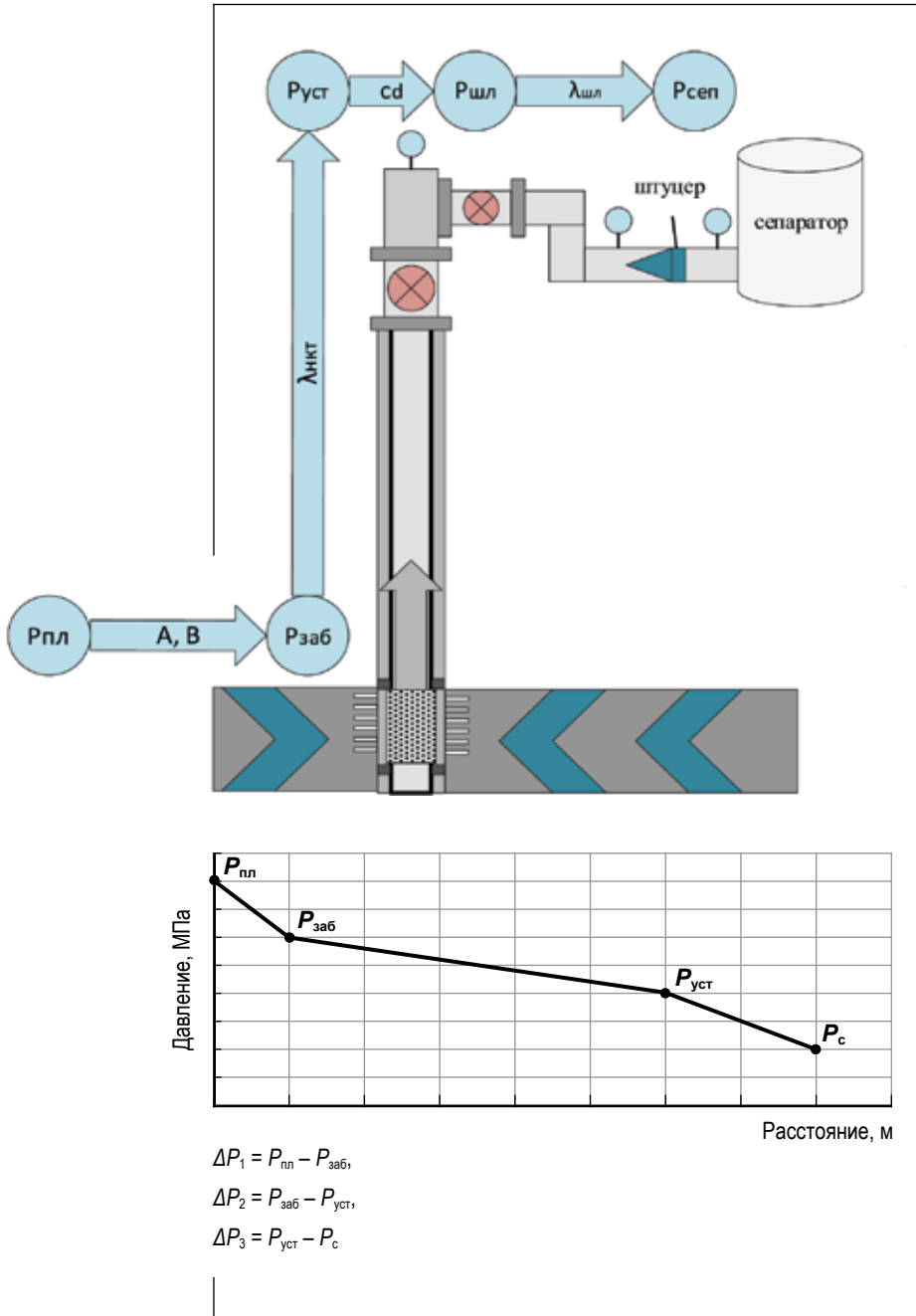


Рис. 1. Расстояние, проходимое потоком газа в системе «пласт-скважина-штуцер-шлейф».

Fig. 1. The distance traveled by the gas flow in the formation «reservoir -well-choke-flowline» system.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the author.

Узловой системный анализ предполагает, что снижение давления в системе «пласт – скважина – штуцер – шлейф» будет определяться суммой снижения давлений во всех элементах рассматриваемой системы, т. е. в любой момент времени суммарное снижение давления будет равно разности пластового давления и давления на входе в сепаратор.

Так, согласно работе [10] узловой анализ проводится исходя из принципа непрерывности давления, то есть в узле системы устанавливается единое значение давления, которое одинаково для всех элементов оборудования, независимо от направления расчета – сверху и вниз или снизу-вверх. Помимо этого, в каждый конкретный момент времени давление на концах системы ($P_{\text{сеп}}$ и $P_{\text{пл}}$) остается постоянным. Таким образом:

$$P_{\text{пл}} - (\text{потери давления в компонентах выше по потоку}) = P_{\text{узла}} \quad (1)$$

$$P_{\text{сеп}} + (\text{потери давления в компонентах ниже по потоку}) = P_{\text{узла}} \quad (2)$$

Примерная процедура узлового анализа состоит в расчете перепада давления в зависимости от дебита в заданном узле с построением кривых притока и оттока, характеризующих соответственно, параметры работы системы от пласта до анализируемого узла (приток) и от сепаратора до анализируемого узла (отток). Точка или точки пересечения данных кривых характеризуют рабочую точку системы. Для построения кривых давления от расхода должны быть известны аналитические зависимости, которые опираются на математические корреляции, моделирующие однофазный или многофазный поток [11]. В результате можно определить потери давления в системе «пласт – скважина – штуцер – шлейф».

Основные достоинства методологии узлового анализа являются:

- повышение эффективности выбора нефтегазопромыслового оборудования при проектировании разработки и освоении месторождений;

- поиск и устранение мест, характеризующихся повышенными потерями давления в процессе эксплуатации;
- увеличение производительности скважин при проведении различных геолого-технических мероприятий;
- подбор наиболее рационального способа эксплуатации скважин по результатам анализа параметров, влияющих на процесс извлечения запасов нефти и газа;
- обоснование оптимального технологического режима работы скважин при наличии различных технико-технологических ограничений.

Узловой анализ широко применяется при интегрированном проектировании разработки нефтяных и газовых месторождений, учитывая его преимущества в части максимизации добычи углеводородов.

2. Детерминированный факторный анализ

Методы факторного анализа, применяемые для оптимизации процессов разработки и эксплуатации нефтегазовых месторождений, подразделяются на детерминированные и стохастические (статистические). Статистический факторный анализ предусматривает определение математической корреляции между анализируемыми переменными, в то время как использование методов детерминированного анализа предполагает, что исследуемые параметры, влияющие на результирующий показатель, находятся в известной взаимосвязи функционального характера [12].

В связи с тем, что многие производственные процессы освоения месторождений можно достаточно адекватно описать математическими формулами, в последнее время методы детерминированного факторного анализа получили широкое распространение в качестве инструментов интегрированного проектирования. Данные методы используются для определения наиболее значимых параметров эксплуатации скважин, влияющих на технологические режимы работы, что позволяет оптимизировать процесс добычи углеводородов [13, 14, 15].

Алгоритмы детерминированного факторного анализа предусматривают обоснование математической модели факторной системы, определение величин влияния каждого исследуемого фактора на отклонение анализируемого результирующего параметра [16].

В статьях [17, 18] для анализа работы скважины предложено в контексте интегрированного проектирования использовать детерминированный факторный анализ. В качестве математической факторной модели рассматривалось уравнение установившегося притока газа при плоскорадиальной фильтрации по нелинейному закону:

$$P_{\text{пл}}^2 - P_{\text{заб}}^2 = AQ + BQ^2, \quad (3)$$

где $P_{\text{пл}}$ – давление в пласте на границе контура питания скважины;
 $P_{\text{заб}}$ – давление на забое скважины;
 A и B – коэффициенты фильтрационных сопротивлений;
 Q – дебит скважины.

При этом результирующим показателем является дебит газа, а значения давлений (пластовое и забойное) и коэффициентов фильтрационных сопротивлений выступают в качестве факторов, влияющих на исследуемый показатель.

В результате решения анализируемого уравнения (3) получим выражение для определения дебита газа:

$$Q = \frac{-A + \sqrt{A^2 + 4B(P_{\text{пл}} - P_{\text{заб}})}}{2B}. \quad (4)$$

Полученная функциональная зависимость (4) является явным видом факторной модели (3).

Допустим, что в исследуемой эксплуатационной скважине дебит газа изменился с величины Q_1 на Q_2 , что может быть связано с изменением параметров входящих в уравнение (3), тогда согласно концепции детерминированного факторного анализа изменение дебита ΔQ можно представить в следующем виде:

$$\Delta Q = \Delta Q_{P_{пл}} + \Delta Q_{P_{заб}} + \Delta Q_A + \Delta Q_B, \quad (5)$$

где $\Delta Q_{P_{пл}}$ – изменения дебита за счет изменения давления в пласте на границе контура питания скважины;
 $\Delta Q_{P_{заб}}$ – изменения дебита за счет изменения давления на забое скважины;
 ΔQ_A и ΔQ_B – изменения дебита за счет изменения коэффициентов фильтрационного сопротивления.

В работе [19] авторы для определения величин влияния факторов, входящих в выражение (5), на дебит газа используют метод полных подстановок и интегральный метод.

Метод полных подстановок [16] (метод взвешенных конечных разностей) предусматривает расчет результирующего показателя для всех вариантов подстановок независимых переменных. Количество возможных вариантов подстановок зависит от числа влияющих факторов, так для факторной модели (5) число вариантов подстановок показателей равно шести по каждому из 4-х факторов, всего $4!$ вариантов.

Наиболее универсальным методом факторного анализа является интегральный метод, предусматривающий единый подход к анализу факторных моделей любого типа независимо от количества влияющих факторов и формы связи между ними. Суть интегрального метода заключается в нахождении полного дифференциала функции дебита скважины и последующем его интегрировании по линии изменения аргументов функции [19].

В работе [20] были рассмотрены вопросы применения детерминированного факторного анализа работы газовой скважины в системе «пласт – скважина – штуцер – шлейф» (рис. 1).

Предложенный в статье алгоритм расчёта влияния изменения технологических параметров скважины на её дебит позволяет анализировать работу газовых скважин, выявлять параметры, критически влияющие на производительность скважин, оценивать успешность проведения ремонтных работ. Следует отметить, что при этом рассматривалось однофазное течение газа и использовались соответствующие уравнения.

3. Сопоставление результатов узлового и факторного анализа на примере газовой скважины

Для проведения узлового и факторного анализа воспользуемся системой уравнений, описывающих движение газа по пласту к забою и НКТ до устья скважины:

$$Aq + Bq^2 + P_{заб}^2 - P_{пл}^2 = 0. \quad (6)$$

$$P_{уст}^2 e^{2s} + c_{тр} \lambda_{тр} q^2 - P_{заб}^2 = 0. \quad (7)$$

где q – расход газа;
 $P_{пл}$ – пластовое давление;
 $P_{заб}$ – забойное давление;
 $P_{уст}$ – давление на устье скважины;
 A, B – коэффициенты гидравлического сопротивления призабойной зоны;
 $\lambda_{тр}$ – коэффициент гидравлического сопротивления НКТ;
 $s, c_{тр}$ – некоторые параметры, постоянные для рассматриваемой скважины, определяемые их конструкцией (глубиной скважины L , диаметром НКТ $D_{вн}$), единицами измерения и т.п.

Рассмотрим анализ технологического режима на примере синтетической газовой скважины, параметры которой представлены в таблице 1 на момент времени t_1 и t_2 .

Таблица 1. ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ СИНТЕТИЧЕСКОЙ ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ
Table 1. Synthetic gas well operating parameters

Параметры	$P_{пл}$	A	B	$P_{уст}$	$\lambda_{тр}$	$D_{вн}$	L
Единицы измерения	МПа	10^{-2} МПа ² / тыс.м ³ /сут	10^{-2} МПа ² / (тыс.м ³ /сут) ²	МПа		см	м
t_1	11,5	0,810	0,008	10,4	0,02	11,4	690,0
t_2	11,2	0,810	0,008	9,8	0,02	11,4	690,0

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

Для проведения узлового анализа были выполнены расчеты с целью построения зависимостей давления от дебита, характеризующих работу лифтовой колонны и пласта.

На рисунке 2 представлены результаты узлового анализа скважины для оценки изменения ее производительности до и после изменения режима работы, что выражается двумя наборами кривых производительности притока и оттока, соответственно.

По графикам можно наблюдать изменения дебита за счет изменения двух параметров, в данном случае это пластовое и устьевое давления. В процессе эксплуатации скважины технологический режим изменился и отмечается снижение пластового давления на 0,3 МПа, а устьевого – на 0,6 МПа.

Из графика видно, что кривые притока и оттока газовой скважины при t_1 пересекаются при забойном давлении 11,0 МПа и значении дебита 327 тыс. м³/сут.

Анализ кривых, представленных на рисунке 2, показывает, что при падении пластового давления до 11,2 МПа, и снижении давления на устье скважины до 9,8 МПа (кривая притока и оттока при t_2) производительность скважины увеличится до 415,6 тыс. м³/сут.

Как видно из анализа графика на рисунке 2, невозможно определить какой из параметров ($P_{пл}$, $P_{уст}$) в большей или меньшей степени оказал влияние на изменение производительности скважины, что является одним из существенных недостатков узлового анализа, тем не менее можно выполнить частичную оценку влияния ограниченного числа факторов. Покажем это на примере рассматриваемой скважины.

Поставим задачу: необходимо определить долю влияния изменения $P_{уст}$ и $P_{пл}$ на дебит скважины по методу узлового анализа. Рассмотрим рисунок 2, где точки A и C являются основными, а B и D промежуточными, которые необходимы для анализа. Возможны два варианта для оценки итогового результата: первый вариант – если двигаться из точки A в точку C , через точку B , а второй вариант – через точку D .

Соответственно, согласно первому варианту, процесс расчета изменения дебита скважины можно представить таким образом:

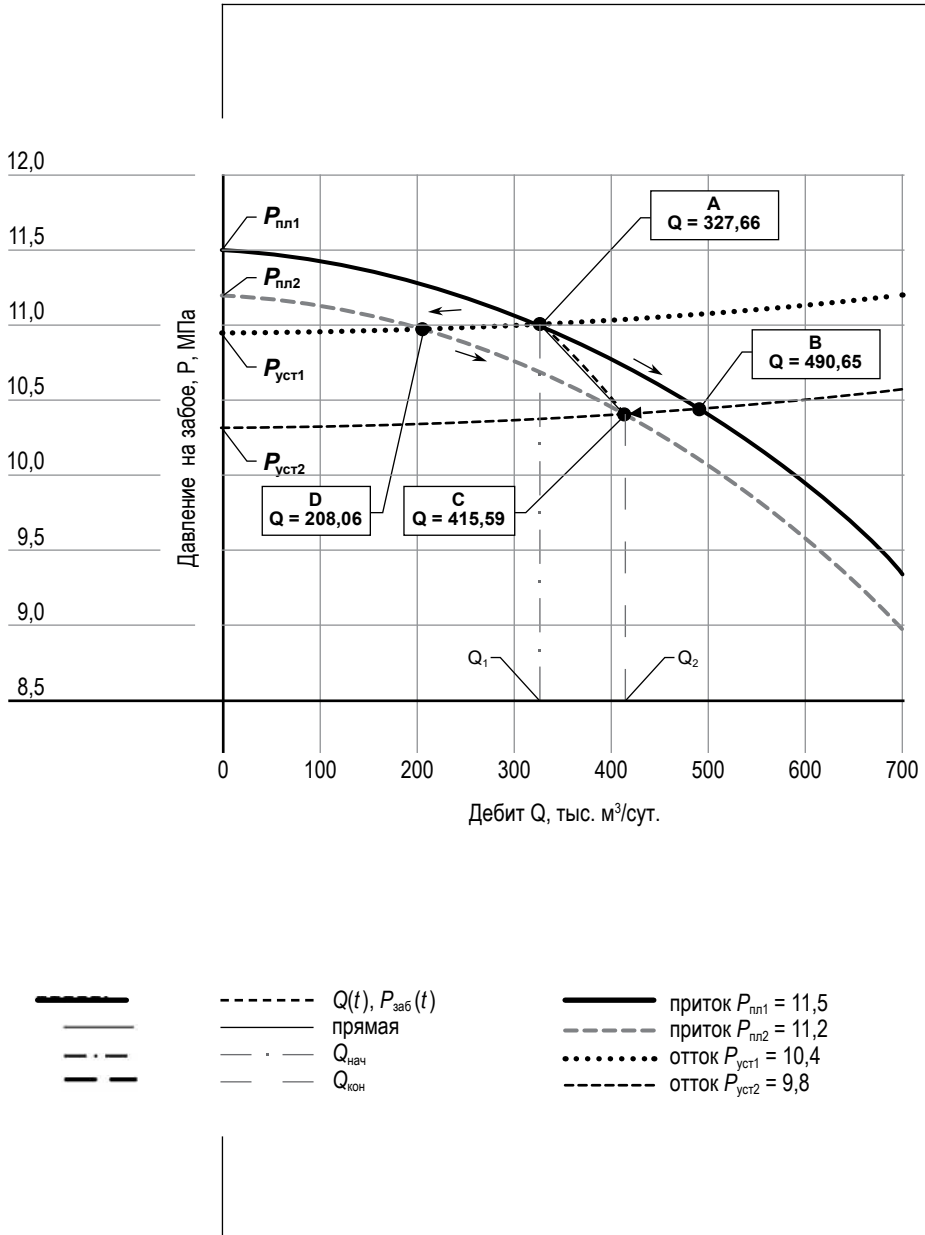


Рис. 2.

Исследование работы газовой скважины при t_1 ($P_{пл1} = 11,5$ МПа, $P_{уст1} = 10,4$ МПа) и t_2 ($P_{пл2} = 11,2$ МПа, $P_{уст2} = 9,8$ МПа) при помощи узлового анализа.

Fig. 2. Analysis of gas well operation under t_1 ($P_{пл1} = 11,5$ МПа, $P_{уст1} = 10,4$ МПа) and t_2 ($P_{пл2} = 11,2$ МПа, $P_{уст2} = 9,8$ МПа) using nodal analysis.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the author.

$$\Delta Q_{\text{Робщ1}} = 87,93 \text{ тыс. м}^3/\text{сут}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{Робщ1}} &= \Delta Q_{\text{Рпл1}} + \Delta Q_{\text{Руст1}} = -75,06 + \\ &+ 162,99 = 87,93 \text{ тыс. м}^3/\text{сут} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{\text{Робщ2}} &= \Delta Q_{\text{Рпл2}} + \Delta Q_{\text{Руст2}} = -119,60 + \\ &+ 207,53 = 87,93 \text{ тыс. м}^3/\text{сут} \end{aligned} \quad (9)$$

В качестве оценки влияния $P_{\text{уст}}$ и $P_{\text{пл}}$ возьмем среднее значение:

$$\Delta Q_{\text{Рпл}} = \frac{1}{2} (\Delta Q_{\text{Рпл1}} + \Delta Q_{\text{Рпл2}}) = -97,33 \text{ тыс. м}^3/\text{сут} \quad (10)$$

$$\Delta Q_{\text{Руст}} = \frac{1}{2} (\Delta Q_{\text{Руст1}} + \Delta Q_{\text{Руст2}}) = 185,26 \text{ тыс. м}^3/\text{сут} \quad (11)$$

Для выполнения факторного анализа работы рассматриваемой скважины воспользуемся алгоритмом, описанном в [21] для системы «пласт – скважина – шлейф».

Предположим, что в момент времени t_1 наблюдались следующие значения параметров системы: давление в пласте $P_{\text{пл1}}$, коэффициенты фильтрационного сопротивления пласта A_1 , B_1 , коэффициент гидравлического сопротивления лифтовых труб $\lambda_{\text{тр}}$; устьевое давление $P_{\text{уст1}}$, при этом дебит равен Q_1 . Далее пусть значения этих параметров изменяются на интервале времени $[t_1, t_2]$ и становятся равными $P_{\text{пл2}}$, A_2 , B_2 , $\lambda_{\text{тр2}}$, $P_{\text{уст2}}$, Q_2 . Очевидно, что изменение параметров $P_{\text{пл}}$, A , B , $\lambda_{\text{тр}}$, $P_{\text{уст}}$ привело к изменению дебита. Согласно детерминированному факторному анализу, задача состоит в определении влияния каждого из параметров $P_{\text{пл}}$, A , B , $\lambda_{\text{тр}}$, $P_{\text{уст}}$ на изменение дебита газовой скважины q , т.е. в получении представления:

$$\Delta Q = \Delta Q_{\text{Рпл}} + \Delta Q_A + \Delta Q_B + \Delta Q_{\lambda_{\text{тр}}} + \Delta Q_{\text{Руст}}. \quad (12)$$

Используя математические модели, аналогичные уравнениям (6, 7), которые применялись при проведении факторный анализ дает возможность оценить вклад каждого компонента, входящего в систему на результирующий показатель – дебит скважины.

Для вывода (9) использован интегральный метод детерминированного факторного анализа [21], где представлен детальный вывод расчетных формул для определения численного влияния вышеуказанных факторов на дебит газовой скважины. Результаты факторного анализа газовой скважины в системе «пласт – скважина» с использованием исходных данных (табл. 1) представлены в таблице 2.

Сопоставим результаты узлового и факторного анализа газовой скважины, которые показаны в таблице 2.

Таблица 2. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО АЛГОРИТМАМ ФАКТОРНОГО И УЗЛОВОГО АНАЛИЗА ЭКСПЛУАТАЦИИ ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ
Table 2. Comparison of results using algorithms for factor and nodal analysis of gas well operation

Изменение дебита, тыс. м ³ /сут	Узловой анализ		Среднее значение	Факторный анализ
	Вариант 1	Вариант 2		
$\Delta Q_{\text{пл}}$	162,99	207,53	185,26	177,59
ΔQ_A	—	—	—	0
ΔQ_B	—	—	—	0
$\Delta Q_{\lambda_{\text{тр}}}$	—	—	—	0
$\Delta Q_{\text{уст}}$	-75,06	-119,60	-97,33	-89,66
ΣQ	87,93	87,93	87,93	87,93

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

Результаты влияния $P_{\text{пл}}$, $P_{\text{уст}}$ на результирующий показатель имеют близкие значения, по которым можно сделать совпадающий вывод: изменение пластового давления оказывает существенно большее влияния на дебит скважины. Нулевые значения в таблице обусловлены тем, что коэффициенты A , B и $\lambda_{\text{тр}}$ не влияли на изменения дебита. Недостатком узлового анализа является тот факт, что при изменении трех и более параметров работы скважины отдельное влияние каждого из них отдельно определить затруднительно, тогда как факторный анализ позволяет оценить влияние каждого фактора, независимо от их количества.

Заключение

В целом методы системного анализа вносят значительный вклад в оптимизацию технологических режимов работы эксплуатационных скважин, как на газовых, так и на нефтяных месторождениях, при этом методология факторного анализа позволяет оценить влияние каждого фактора, т. е. можно определить долю влияния каждого из параметров на изменения дебита. В то время как применение узлового анализа в его стандартном варианте ограничено, поскольку при изменении трех и более параметров работы скважины влияние каждого из них отдельно определить не представляется возможным без его модификации и многовариантных расчетов.

Таким образом, метод детерминированного факторного анализа может применяться как дополнение и расширение узлового анализа, обеспечивая достижения синергетического эффекта при оптимизации технологических процессов добычи нефти и газа. Сопоставление расчетов, полученных рассматриваемыми двумя методами, позволяет комплексно оценить эффективность проведенного мероприятия на скважине с учетом работы подземного и наземного оборудования.

Список источников

1. Барбер Э. и др. Оптимизация добычи: от продуктивного пласта до пункта подготовки нефти и газа // Нефтегазовое обозрение. 2008. Т. 19. № 4. С. 22.
2. Хасанов М. М. и др. Иерархия интегрированных моделей / М. М. Хасанов, И. С. Афанасьев, А. Р. Латыпов, В. А. Павлов, Д. А. Антоненко, Суртаев В. Н. Доклад на Российской технической конференции и выставке нефти и газа SPE, Москва, Россия, октябрь 2008 г. С. 1–7 [Электронный ресурс]. URL: <https://onepetro.org/SPERPTC/proceedings-abstract/08ROGC/08ROGC/SPE-117412-MS/145304> (дата обращения: 07.10.2025).
3. Salaudeen, I. Optimization of Petroleum Production System using Nodal Analysis Program / I. Salaudeen, D. Bopbekov, A. Abdulkarim // Nigerian Journal of Technological Development. 2022. Vol. 19. No. 1. P. 1-8.
4. Jansen J.D. Nodal analysis of oil and gas production systems. SPE, 2017. 368 p.

5. Развитие интегрированного проектирования в ОАО «НК «Роснефть» / Ю. В. Некипелов, К. Е. Латкин, Р. Р. Исмагилов [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2010. № 8. С. 6–9.
6. Lee J., Nickens H., Wells M. The operation of the watering gas wells. Technological solutions for removing fluid from wells, Translation from English. M.: Premium Engineering, 2008. P. 384.
7. Bitsindou A. B., Kelkar M. G. Gas Well Production Optimization Using Dynamic Nodal Analysis. Paper presented at the SPE Mid-Continent Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, March 1999. P. 1-9. <https://doi.org/10.2118/52170-MS>
8. Gilbert W. E. Flowing and Gas-Lift Well Performance. API Drilling and Production Practice, Dallas, Texas; 1954. P. 126–157.
9. Brown K. E., Lea J.F. Nodal Systems Analysis of Oil and Gas Wells // J Pet Technol. 1985. No. 37(10). P. 1751–1763.
10. Dale B. H. Production Optimization using Nodal Analysis, OGC Publications, Tulsa, 1991. 411 p.
11. Applied Multiphase Flow in Pipes and Flow Assurance: Oil and Gas Production / Al-Safran E. M., Brill J.P. // Society of Petroleum Engineers, 2017. 358 p.
12. Факторный анализ успешности геолого-технических мероприятий как инструмент повышения качества геолого-гидродинамических моделей / М. В. Наугольнов, Е. В. Растегаева, Р. З. Зулькарниев, Р. Н. Асмандияров // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2019. № 1(11). С. 34–38 <https://doi.org/10.24887/2587-7399-2019-1-7-11>.
13. Факторный анализ параметров работы газовых скважин / А. И. Щекин, В. В. Вержбицкий, Т. А. Гунькина, А. В. Хандзель // Георесурсы. 2022. Т. 24. № 3. С. 139–148.
14. Применение факторного анализа при управлении технологическими процессами эксплуатации скважин на подземных хранилищах газа / А. И. Щекин, В. В. Вержбицкий, Т. А. Гунькина и др. // Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли. Проблемы устойчивого развития территорий: сборник трудов II Международной научно-практической конференции (9–10 декабря 2021 г.). Ставрополь: ООО Бюро новостей, 2021. С. 320–325.
15. Proactive Block-Factor Analysis of Oil Field Development [Electronic resource] / A. N. Sitnikov, A. A. Pustovskikh, A. S. Margarit et al. // SPE Russian Petroleum Technology Conference. M., 2015. URL: <https://onepetro.org/SPERPTC/>

- proceedings-abstract/15RPTC/All-15RPTC/SPE-176572-MS/183745 (accessed 20.01.2022).
16. Блюмин С. Л. Экономический факторный анализ: Монография / С. Л. Блюмин, В. Ф. Суханов, С. В. Чеботарев. Липецк: ЛЭГИ, 2004. 148 с.
 17. Вержбицкая В. В. Факторный анализ работы газовой скважины в системе «пласт – скважина – газопровод» / В.В. Вержбицкая, А. И. Щекин, А. В. Хандзель // Актуальные вопросы исследования нефтегазовых пластовых систем: V Международная научно-практическая конференция: тезисы докладов, Москва, 3–4 октября 2024 года. Москва: Научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий. Газпром ВНИИГАЗ, 2024. С. 13.
 18. Вержбицкая В. В. Исследование работы, обводняющийся газовой скважины в системе «пласт – скважина – шлейф» на основе применения детерминированного факторного анализа / В. В. Вержбицкая, А. И. Щекин, А. В. Хандзель // Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли: Сборник трудов V Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения проф. К.М. Тагирова, Ставрополь, 02–06 декабря 2024 года. Ставрополь: «Агрус» Ставропольского государственного аграрного университета, 2024. С. 197–200.
 19. Щекин А. И. Системный подход к оптимизации технологических процессов на газовых скважинах / А. И. Щекин, В. В. Вержбицкая, А. В. Хандзель // Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли. Проблемы устойчивого развития территорий: Материалы IV Международной научно-практической конференции, посвященной 30-летию факультета нефтегазовой инженерии СКФУ, Ставрополь, 07–08 декабря 2023 года. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2023. С. 396–399.
 20. Shchekin A., Verzhbitskaya V., Handzel A. Applying Deterministic Factor Analysis to Study Gas Well Operation, 2023 5th International Conference on Problems of Cybernetics and Informatics (PCI), Baku, Azerbaijan, 2023. P. 1–3, <https://doi.org/10.1109/PCI60110.2023.10325921>.
 21. Вержбицкая В. В. Оптимизация технологических режимов работы скважин методами системного анализа / В.В. Вержбицкая, А. И. Щекин, В. В. Вержбицкий // Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли: Сборник трудов V Международной научно-практической конферен-

ции, посвященной 90-летию со дня рождения профессора К.М. Тагирова, Ставрополь, 2–6 декабря 2024 года. Ставрополь: «АГРУС» Ставропольского государственного аграрного университета, 2024. С. 193–197.

References

1. Barber E. et al. Production optimization: from the productive formation to the oil and gas treatment point. *Oil and Gas Review*. 2008;(4). P. 22. (in Russ.).
2. Khasanov MM, Afanasyev IS, Latypov AR, Pavlov VA, Antonenko DA and Surtaev VN. Hierarchy of Integrated Models. Report at the Russian Technical Conference and Oil and Gas Exhibition SPE, Moscow, Russia, October 2008: 1-7. (in Russ.). <https://doi.org/10.2118/117412-MS>
3. Salaudeen I, Bopbekov D, Abdulkarim A. Optimization of Petroleum Production System using Nodal Analysis Program. *Nigerian Journal of Technological Development*. 2022; (19): 1-8.
4. Jansen JD. Nodal analysis of oil and gas production systems. *SPE*, 2017. 368 p.
5. Nekipelov YuV, Latkin KE, Ismagilov RR [et al.] Development of integrated design at Rosneft Oil Company. *Oil industry*. 2010; (8): 6-9. (in Russ.).
6. Lee J., Nickens H.W., Wells M. The operation of the watering gas wells. Technological solutions for removing fluid from wells, Translation from English. M.: Premium Engineering, 2008. P. 384.
7. Bitsindou AB, Kelkar MG. Gas Well Production Optimization Using Dynamic Nodal Analysis. Paper presented at the SPE Mid-Continent Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, March 1999. P 1-9 <https://doi.org/10.2118/52170-MS> [Electronic resource]. URL: <https://onepetro.org/SPEOK-OG/proceedings-abstract/99MCOS/99MCOS/SPE-52170-MS/60438> (accessed: 07.10.2025).
8. Gilbert WE. Flowing and Gas-Lift Well Performance. *API Drilling and Production Practice*, Dallas, Texas; 1954, p. 126 – 157.
9. Brown KE., Lea JF. Nodal Systems Analysis of Oil and Gas Wells. *J Pet Technol*, 1985;37(10): 1751-1763.
10. Dale BH. Production Optimization using Nodal Analysis, OGCI Publications, Tulsa, 1991. 411 p.
11. Al-Safran E.M, Brill JP. Applied Multiphase Flow in Pipes and Flow Assurance: Oil and Gas Production. Society of Petroleum Engineers, 2017. 358 p.

12. Naugolnov MV, Rastegaeva EV, Zulkarniev RZ, Asmandiyarov RN. Factor analysis of the success of geological and technical measures as a tool for improving the quality of geological and hydrodynamic models. PRONEFT. Professionally about oil. 2019;1(11): 34-38 <https://doi.org/10.24887/2587-7399-2019-1-7-11>. (in Russ.).
13. Shchekin AI, Verzhbitsky VV, Gun'kina TA, Handzel AV. Factor analysis of gas well performance parameters. Georesources, 2022;24(3): 139–148. (in Russ.) <https://doi.org/10.18599/grs.2022.3.12>
14. Shchekin AI, Verzhbitsky VV, Gunkina TA et al. The use of factor analysis in the management of technological processes for the operation of wells in underground gas storage facilities. Innovative technologies in the oil and gas industry. Problems of sustainable development of territories: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference (December 09-10, 2021). Stavropol, 2021. P. 320-325. (in Russ.).
15. Sitnikov AN, Pustovskikh AA, Margarit AS et al. Proactive Block-Factor Analysis of Oil Field Development [Electronic resource] / SPE Russian Petroleum Technology Conference. 2015. – URL: <https://onepetro.org/SPERPTC/proceedings-abstract/15RPTC/All-15RPTC/SPE-176572-MS/183745> (accessed 20.01.2022).
16. Blyumin SL. Economic factor analysis. Lipetsk: LEGI, 2004. 148 p. (in Russ.).
17. Verzhbitskaya VV, Shchekin AI, Khandzel AV. Factor analysis of gas well operation in the 'reservoir - well - gas pipeline' system. Topical issues of oil and gas reservoir systems research : V International Scientific and Practical Conference : abstracts, Moscow, October 03-04, 2024. Moscow: Scientific Research Institute of Natural Gases and Gas Technologies, Gazprom VNIIGAZ, 2024. P. 13. (in Russ.).
18. Verzhbitskaya VV, Shchekin AI, Handzel AV. Investigation of the operation of a flooded gas well in the plast-well-plume system based on the application of deterministic factor analysis. Innovative technologies in the oil and gas industry : Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of Professor K.M. Tagirov, Stavropol, December 02-06, 2024. Stavropol: AGRUS of Stavropol State Agrarian University, 2024. P. 197-200. (in Russ.).
19. Shchekin AI, Verzhbitskaya VV, Handzel AV. A systematic approach to optimizing technological processes at gas wells. In-

- novative technologies in the oil and gas industry. Problems of sustainable development of territories: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference dedicated to the 30th anniversary of the NCFU Faculty of Petroleum Engineering, Stavropol, December 07-08, 2023. Stavropol: North-Caucasus Federal University, 2023. P. 396-399. (in Russ.).
20. Shchekin AI, Verzhbitskaya VV, Handzel AV. Applying Deterministic Factor Analysis to Study Gas Well Operation, 2023 *5th International Conference on Problems of Cybernetics and Informatics (PCI)*, Baku, Azerbaijan, 2023. P. 1-3, doi: 10.1109/PCI60110.2023.10325921.
 21. Verzhbitskaya VV, Shchekin AI, Verzhbitsky VV. Optimization of technological modes of well operation by methods of system analysis. Innovative technologies in the oil and gas industry: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference dedicated to the 90th anniversary of the birth of Professor K.M. Tagirov, Stavropol, December 02-06, 2024. Stavropol: AGRUS of Stavropol State Agrarian University, 2024. P. 193-197. (in Russ.).

Информация об авторе

Виктория Владимировна Вержбицкая — старший преподаватель кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 57223104164, Researcher ID: OLP-6540-2025

Information about the author

Victoria V. Verzhbitskaya — Senior Lecturer of the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 57223104164, Researcher ID: OLP-6540-2025.



Научная статья
УДК 622.276.4
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.7>

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ И ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТОВ- КОЛЛЕКТОРОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Рамиз Алиджавад-оглы Гасумов^{1*},
Эльдар Рамизович Гасумов²,
Юлианна Константиновна Димитриади³,
Абдул-Гапур Гусейнович Керимов⁴,
Наталья Григорьевна Федорова⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Северо-Кавказский федеральный университет (д.1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)

² Азербайджанский технический университет (д. 25, пр. Г. Джавида, 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>

³ iudimitriadi@ngfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6807-9427>

⁴ akerimov@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4880-787X>

⁵ fng8@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0383-3134>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

В статье рассмотрены вопросы изучения характера и масштабов разрушения коллекторов в процессе эксплуатации залежей газа при разработке газовых месторождений. Изучены состояние диагностики и прогноза разрушения пласта-коллектора на газовых месторождениях и эксплуатации подземных хранилищ газа. В связи серьезности рассматриваемой задачи и актуальности вопроса обоснованы необходимость дополнительных исследований, для разработки надёжных методик диагностики состояния призабойной зоны пласта, оценки характера и масштабов разрушения продуктивных пластов, а тем более способы прогнозирования таких процессов. Исследованы причины возникновения из-за разрушения коллектора в призабойной зоны пласта осложнений в эксплуатации скважин, рассмотрены возможные пути их предотвращения, за счёт создания методы прогнозирования поведения продуктивных пластов для различных типов коллекторов в условиях воздействия на коллекторы сложных многофазных газодинамических и гидродинамических потоков. Выполнены сбор, обобщение и анализ геологических и промысловых материалов, а также рассмотрены геолого-гидрогеологические условия для выявления причин разрушения коллектора и других осложнений и прогноз процессов, позволяющих разработать необходимые способы и технико-техно-

логические мероприятия, предотвращающие и предупреждения подобных осложнений.

Исследованы влияния геолого-технологических параметров на состояние прискважинной зоны, определены характер, масштабы и причины разрушения пород-коллекторов, предложены рекомендации, технические и технологические мероприятия по их предотвращению и борьбе с разрушением коллекторов при эксплуатации газовых месторождений. Для каждой залежи, в зависимости от её особенностей, должен обосновываться свой комплекс методов получения информации, в котором могут преобладать те или иные методы. Полученные результаты могут быть использованы для разработки технико-технологических мероприятий по борьбе с разрушением пласта-коллектора.

Ключевые слова: газовая залежь, коллектор, прискважинная зона, эксплуатация, разрушения пласта-коллектора, месторождения

Для цитирования: Гасумов Р. А. и др. Исследование механизмов и причин разрушения пластов-коллекторов при разработке газовых месторождений / Р. А. Гасумов, Э. Р. Гасумов, Ю. К. Димитриади, А-Г.Г. Керимов, Н.Г. Федорова // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 4. С. 151–174. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.7>

Конфликт интересов: доктор технических наук, профессор Гасумов В.А. является членом редакционного совета журнала «Наука. Инновации. Технологии», доктора технических наук, профессора Гасумов Р.А., Керимов А.Г. и Федорова Н.Г. являются членами редакционной коллегии журнала «Наука. Инновации. Технологии». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанным с этой рукописью..

Статья поступила в редакцию 10.06.2025;
Одобрена после рецензирования 20.10.2025;
Принята к публикации 14.12.2025.

2.8.4. Development and operation of oil and gas fields (technical sciences)

Research Article

The study of mechanisms and causes of reservoir destruction in gas field development

Ramiz A. Gasumov^{1*},
Eldar R. Gasumov²,
Yulianna K. Dimitriadi³,
Abdul-Gapur G. Kerimov⁴,
Natalia G. Fedorova⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} 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/0000-0002-2704-0523>
³ iudimitriadi@ngfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6807-9427>
⁴ akerimov@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4880-787X>
⁵ fng8@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0383-3134>
* Corresponding author

Abstract.

The article examines the nature and extent of reservoir failure in gas field development. It studies the state of reservoir failure diagnostics and prediction in gas fields and underground gas storage facilities. Given the relevance of the issue, the need for additional research is justified to develop reliable methods for diagnosing the state of the near-wellbore zone, assessing the nature and extent of productive formation failure, and, especially, methods for predicting such processes. The causes of well operation complications due to reservoir failure in the near-wellbore zone are investigated, and possible ways to prevent them are discussed by developing a method for predicting the behavior of productive formations for various reservoir types under conditions of complex multiphase gas-dynamic and hydrodynamic flows. Geological and field data were collected, summarized and analyzed. Geological and hydrogeological conditions were examined to identify the causes of reservoir failure and other complications, and processes were forecasted to enable the development of necessary methods and technical and technological measures to prevent and manage such complications.

The influence of geological and technological parameters on the condition of the near-wellbore zone was studied, the nature, scale, and causes of reservoir rock failure were determined, and recommendations and technical and technological measures for preventing and managing reservoir failure during gas field development were proposed. For each reservoir, depending on its characteristics, a specific set of methods for obtaining information should be justified, with certain methods being predominant. The results obtained will be used to develop technical and technological measures to combat reservoir failure.

Keywords: gas deposit, reservoir, near-wellbore zone, operation, reservoir formation destruction

For citation: Gasumov RA, Gasumov ER, Dimitriadi YK, Kerimov A-GG, Fedorova NG. The study of mechanisms and causes of reservoir destruction in gas field development. *Science. Innovations. Technologies.* 2025;(4): 151-174. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.7>

Conflict of interest: Doctor of Technical Sciences, Professor V.A. Gasumov is a member of the editorial board of the journal "Science. Innovations. Technologies." Doctors of Technical Sciences, Professors R.A. Gasumov, A.G. Kerimov, and N.G. Fedorova are members of the editorial board of the journal "Science. Innovations. Technologies." The authors are not aware of any other potential conflicts of interest related to this manuscript.

The article was submitted 10.06.2025;
approved after reviewing 20.10.2025;
accepted for publication 14.12.2025.

Введение

Анализ промысловых данных разработки газовых месторождениях (ГМ) показывает, что в большинстве эксплуатационных скважин происходит разрушение пласта-коллектора и осложнения в призабойной зоне пласта (ПЗП), и потом наблюдаются нарушения структуры продуктивной залежи. А это может привести к негативным последствиям для разработки месторождения углеводородов (УВ), в том числе: неравномерное распределение пластового давления в пределах залежи; снижение проницаемости и пропускной способности продуктивного пласта; потеря значительных объёмов извлекаемых запасов УВ. В связи с этим изучение характера и масштабов разрушения коллекторов в процессе эксплуатации залежей газа является актуальной задачей, решение которой должно повысить надёжность и эффективность разработки месторождений УВ [1–3].

Исследование механизмов и причин разрушения пластов-коллекторов при разработке ГМ направлено на изучение процессов, связанных с выносом песка и продуктов разрушения пород-коллектора из скважин, и разработку методов предотвращения и снижения негативного влияния разрушения. Эта проблема характерна для залежей, вступающих в заключительную стадию разработки, что осложняет эксплуатацию скважин.

Своевременное выявление зон повышенной трещиноватости, оценка устойчивости коллектора к нагрузкам и прогнозирование динамики пескопроявления (выноса песка из пласта) путём осуществления методов диагностики и прогноза разрушения пласта-коллектора на ГМ могут позволить реализовать мероприятия, предотвращающие возможные осложнения и обеспечивающие эффективную разработку залежи УВ [4].

Возникающие из-за разрушения коллектора в ПЗП осложнения в эксплуатации скважин возможно предотвратить, если совершенствовать методы прогнозирования поведения продуктивных пластов для различных типов коллекторов в условиях воздействия на коллекторы сложных многофазных газодинамических и гидродинамических потоков.

Анализ и изучение причин разрушения коллектора и других осложнений и прогноз процессов позволят разработать необходи-

мые способы и технико-технологические мероприятия, предотвращающие и предупреждающие подобные осложнения.

Материалы и методы исследований

В качестве информационных источников использованы результаты изучения данных бурения, освоения и эксплуатации скважин на газовых месторождениях, где происходило разрушение пласта-коллектора и выявлялись осложнения в призабойной зоне пласта. Для проведения оценки структурных изменений в породно-флюидальной системе горного объекта были использованы промысловые, геологические и статистические материалы, данные геофизических и гидродинамических исследований, а также материалы по вскрытию продуктивных пластов, освоению и эксплуатации скважин месторождениях углеводородов (УВ) в различных горно-геологических условиях. Для изучения характера и масштабов разрушения коллекторов в процессе эксплуатации залежей газа при разработке газовых месторождений использованы различные методы, в том числе: изучение результатов лабораторных исследований о геолого-физических свойствах пород и физико-химических свойствах УВ и пластовой воды; результаты геофизических исследований для изучения геологических разрезов скважин; материалы гидродинамических исследований для определения физических свойств и продуктивности пластов-коллекторов; промысловые данные наблюдения за работой добывающих и нагнетательных скважин.

Результаты исследований и их обсуждение

Разработка газовых месторождений повсеместно сопровождается разрушением матрицы породы-коллектора в ПЗП, что широко распространено в высокопродуктивных объектах, проводящих к ухудшению условий отбора УВ через фильтр и прифильтовую зону пласта.

Исследование механизмов и причин разрушения пластов-коллекторов при разработке ГМ позволяет выделить некоторые подходы (рис. 1).

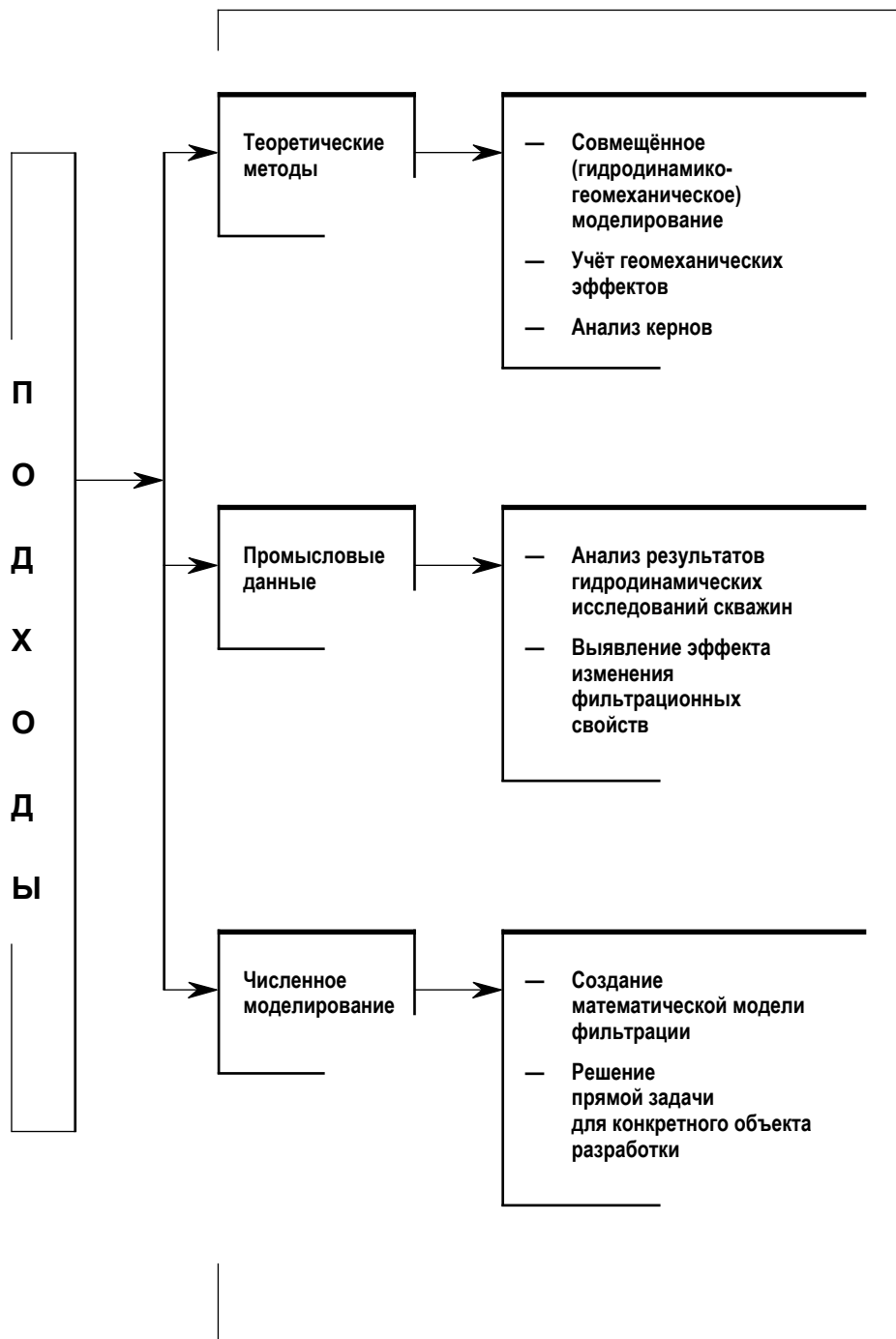


Рис. 1.

Подходы исследования механизмов и причин разрушения пластов-коллекторов при разработке ГМ.

Fig. 1. Approaches to studying the mechanisms and causes of reservoir destruction during gas field development.

В комплексе сложных физико-химических явлений, следствием протекания которых в породно-флюидальной системе газовой залежи является снижение продуктивности скважин, наиболее опасными являются процессы разрушения ПЗП, сопровождающиеся такими осложнениями, как кавернообразование, песчаные пробки в стволах скважин, обрушение кровли каверны, смятие колонн и др. Разработка методов диагностики характера и масштаба разрушения коллекторов различного типа, а тем более технические и технологические решения по предотвращению и борьбе с этими разрушениями, возможна только на основе чётких представлений и знаний о механизмах и процессах, происходящих в породно-флюидальных системах ГМ при их эксплуатации [2, 5]. Вопросы диагностики и прогноза разрушения пласта-коллектора на ГМ являются серьёзной задачей и нуждаются в дополнительных исследованиях для разработки надёжных методик диагностики состояния ПЗП, оценки характера и масштабов разрушения продуктивных пластов, а тем более способов прогнозирования таких процессов.

Можно условно выделить задачи диагностики и прогноза разрушения пласта-коллектора на ГМ (рис. 2).

Любое вмешательство в породно-флюидальную систему горного объекта нарушает сложившееся равновесие и ведёт к перераспределению напряжений ранее бывших взаимокompенсированными. При вмешательстве в породно-флюидальную систему горного объекта происходит воздействие на свойства горных пород и флюидов, которое может быть направлено на изменение структуры, состава или состояния породных массивов, а также на управление движением флюидов в пласте.

Вмешательства в породно-флюидальную систему горного объекта могут быть связаны с разработкой месторождений, подземными горными работами или другими задачами, требующими управления свойствами геологической среды [5, 6]. Можно выделить некоторые виды вмешательства в породно-флюидальную систему горного объекта (табл. 1).

Исходя из теории разрушения твёрдых тел, представленных слоями с различной жёсткостью, породный массив в первую очередь разрушается обязательно по контактам разнофациальных пород.

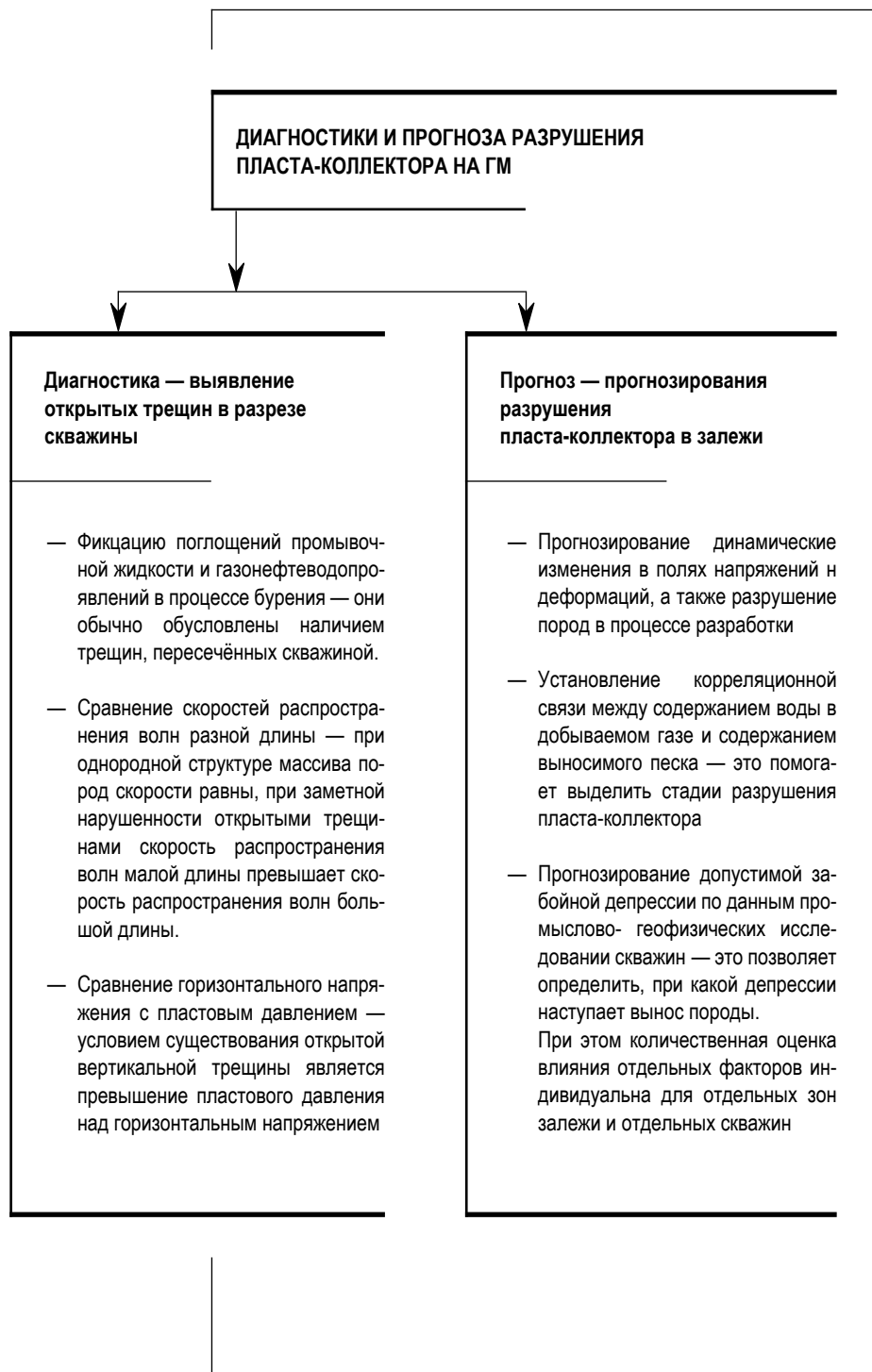


Рис. 2.

Диагностика и прогноз разрушения пласта-коллектора на ГМ.

Fig. 2. Diagnostics and forecast of reservoir failure in gas fields.

Таблица 1. НЕКОТОРЫЕ ВИДЫ ВМЕШАТЕЛЬСТВА В ПОРОДНО-ФЛЮИДАЛЬНУЮ СИСТЕМУ ГОРНОГО ОБЪЕКТА
Table 1. Some types of intervention in the rock-fluid system of a mining object

Виды	Проявления
Флюидоразрыв	Разрыв среды давлением внедряющегося в неё флюида, создание трещин, снижающих прочностные характеристики породы на заданном участке или изменяющих проницаемость вмещающей среды. Используется для решения задач на действующих горных предприятиях, например, принудительного обрушения кровли, дегазации угольных пластов
Воздействие на флюидальную компоненту	Поддержание фильтрующейся части пластового флюида в однофазном состоянии, уменьшение остаточной нефтегазоконденсатонасыщенности, снижение вязкости пластовых флюидов
Воздействие на коллекторную компоненту	снижение фильтрационных сопротивлений при эксплуатации коллектора, повышение коэффициента охвата

Зоны контактов глин с песчаниками (покрышка-коллектор), являются одновременно областями развития (накопления) и разгрузки (сброса) напряжения. Здесь преломление и торможение трещин при их движении от менее плотных (акустически менее жёстких) в сторону более плотных и жёстких пород образует систему трещин и сколов (зона разуплотнения), по которой происходит фильтрация. Во всех случаях зоны переходов покрышек и коллекторов, а также контакты пластов алевролитов и песчаников с различной глинистостью, являются ослабленными зонами развития интенсивного разрушения и формирования каналов для струйного течения флюидов. Отмеченный механизм подтверждается многочисленными промысловыми материалами. А также имеют место и другие факторы, вызывающие разрушение пластов-коллекторов при эксплуатации ГМ, суть основных из них сводится тому, что релаксация горного давления при декомпрессировании газовой залежи приводит к формированию тангенциальных напряжений, разрушающих коллектор в ПЗП. Формирование сложно построенных многофазных потоков-флюидов наиболее интенсивно в ПЗП. Такие многофазные потоки образуются, как правило, при вторжении пластовых

вод, а также при разработке залежей с проявлением "внутреннего" водонапорного режима.

Ускоренное разрушение коллектора часто объясняется увеличением массового расхода флюида через ПЗП, а также породную стенку скважины в зоне фильтра, и пульсирующим характером фильтрации. Это связано с тем, что при высоких скоростях фильтрации флюида в пористой среде создаётся гидродинамическое давление, которое может превосходить предел прочности связи между элементами пористой структуры. В результате происходит разупрочнение скелета породы и вынос твёрдых механических примесей в ствол скважины [7].

Увеличение плотности фильтрующегося флюида происходит при обводнении скважин пластовыми водами (свободными, плёночными, остаточными). В этом случае при высоких дебитах газа вода может двигаться в диспергированном состоянии и, бомбардируя стенки каналов фильтрации, выбивать отдельные частицы из скелета пласта [8, 9].

Исследования показали, что передвижение воды в плёночном виде по стенкам пор и каналов тока уменьшает их просветность, и скорость флюидного потока в пережимах резко возрастает, вызывая ускоренное разрушение породы-коллектора. Возможно и действие расклинивающего эффекта тонких плёнок воды, которое также ведёт к отрыву частиц породы от стенок пор, каналов, трещин и т.п. При конденсации паров воды в ПЗП могут происходить процессы набухания глинистых минералов, растворения цемента коллектора. В тонких плёнках воды в капиллярных каналах должны возникать также и «фильтрационные» эффекты. При определённом сочетании размеров пор и скорости движения воды может происходить растворение минеральных веществ, цементирующих песчинки пласта-коллектора [10, 11]. Можно выделить некоторые возможные причины, вызывающие изменение структуры пласта-коллектора (рис. 3).

Фильтрационные свойства пласта-коллектора определяются, прежде всего, природными свойствами породы и функционированием таких взаимосвязанных и взаимовлияющих элементов добывающей системы, как скважина, прискважинная зона и межскважинная часть пласта.

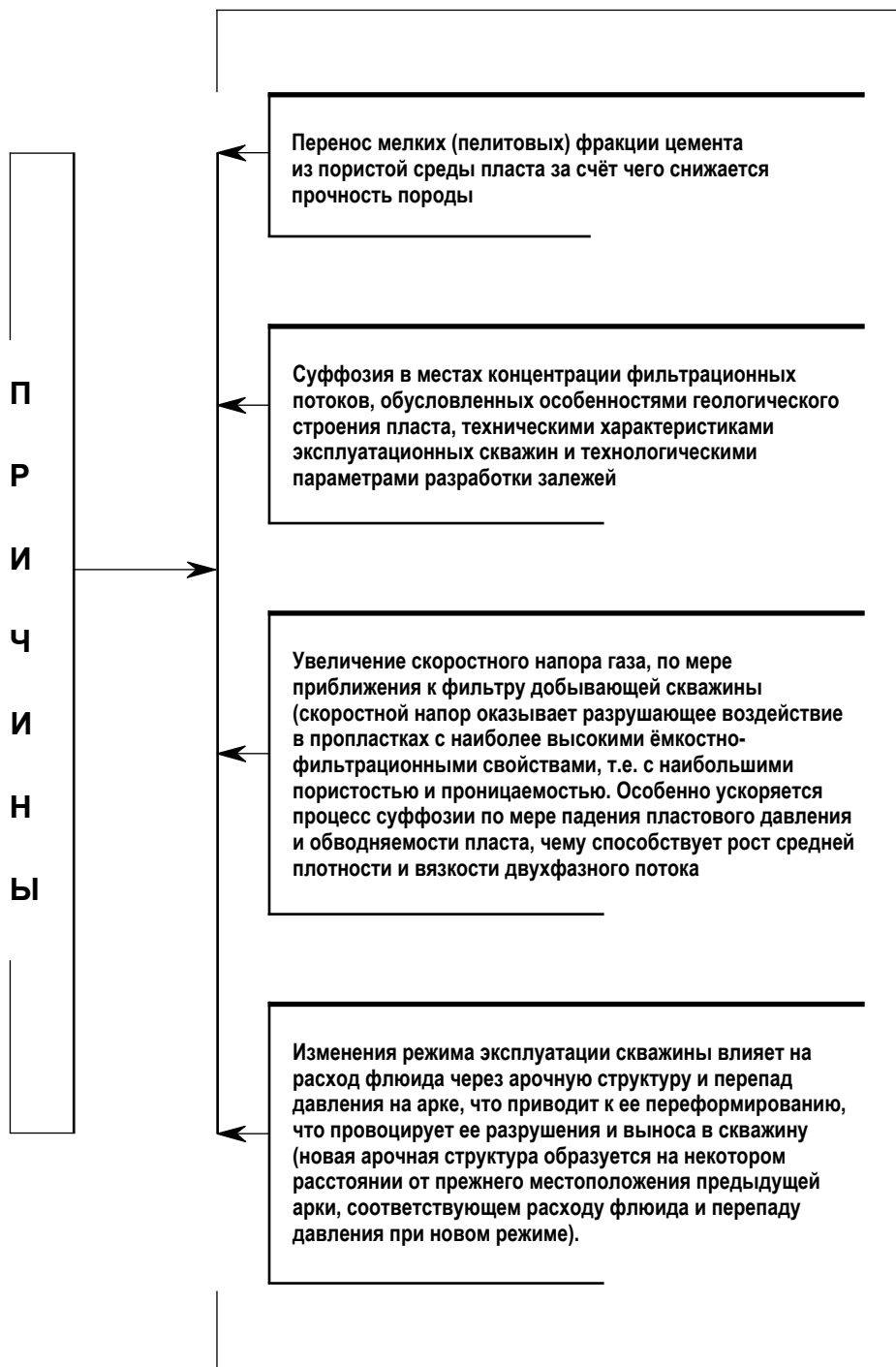


Рис. 3.

Некоторые возможные причины, вызывающие изменение структуры пласта-коллектора.

Fig. 3. Some possible causes of changes in the structure of the reservoir

При вскрытии пласта бурением и последующих технологических операций строительства и апробирования скважин, а также при капитальных ремонтах и других вмешательствах в породно-флюидальную систему, практически всегда происходит ухудшение фильтрационных свойств продуктивного пласта в околоскважинной зоне. Это приводит к снижению продуктивности скважин, потери значительной части пластовой энергии на преодоление фильтрационных сопротивлений [12].

Учитывая особенности падения давления в околоскважинной зоне, а именно резкое увеличение градиентов давления при приближении к стенке скважины, становится ясным, что среднюю проницаемость добывающей системы определяет проницаемость именно прискважинной области, несмотря на ее незначительные размеры.

В связи с вышеизложенным, понятно, что одним из основных факторов, определяющих поведение коллектора в околоскважинном (прифильтровом) пространстве, является и характер фильтрации флюида, а также тип его течения. При ламинарном типе течения флюида, как правило, наступает равновесие взаимодействующих сил, формирующих устойчивые арочные структуры и, соответственно, может замедляться темп разрушения пласта в условиях установившегося режима фильтрации.

При турбулентном режиме течения газа временные арочные структуры под воздействием пульсирующих скоростей и давлений разрушаются, что приводит к новым разрушениям пласта [13].

Снижение динамической полезной ёмкости коллектора происходит и при изменении насыщения пласта разными фазами по мере разработки залежей УВ. Образование граничных (аномальных) слоёв воды на поверхности скелета породы, а также пристанных слоёв, состоящих из "армированной" газом и (или) механическими микрочастицами остаточной воды, приводит к снижению просветности фильтрующих пор и каналов.

Существенной причиной, ускоряющей разрушение гранулярных коллекторов, является их неоднородное строение. Образование в пластах каверн устойчивости может временно задержать разрушение коллектора. Однако при больших размерах каверн вокруг ство-

ла скважины создаётся куполообразная область субвертикальных напряжений, сжимающих пласт в кольцеобразной зоне диаметром 2–5 м и более, что приводит к сужению каналов тока, а также к образованию временных арочных структур. При прохождении через такие кольцеобразные зоны сужения каналов потоков флюидов происходит дальнейшее разрушение пласта за счёт пульсирующих гидрорывов. Указанные механизмы разрушения коллекторов проявляются в пласте как отдельно, так и совместно в различных сочетаниях и являются взаимосвязанными и взаимообусловленными [14, 15].

Перечисленными механизмами и процессами не ограничивается перечень причин разрушения пластов-коллекторов. Многие из них являются ещё недостаточно изученными, а ряд процессов – малоизвестными. Представляется целесообразным проведение исследований по изучению механизмов разрушения коллекторов при процессах образования газовых эмульсий и пульсирующей фильтрации двухфазных (газ, вода) потоков.

Проведённые исследования показали необходимость разработки комплекса методов диагностики характера и масштабов разрушения ПЗП в ГМ на основе моделирования процессов преобразования структуры коллекторов при фильтрации сложных газодинамических потоков в условиях нестационарных фазовых проницаемостей. Результаты исследований разрушающего воздействия различных процессов, происходящих в продуктивных пластах при разработке, должны быть основой рекомендаций, технических и технологических мероприятий по сохранению и восстановлению прочностных и фильтрационных характеристик коллекторов различного типа.

Анализ промысловой геолого-технической информации, раскрывающей основные причины, механизмы и масштабы разрушения продуктивных коллекторов, проводились преимущественно по базовым месторождениям Западной Сибири, а именно скважинам сеноманских залежей. Для этих продуктивных пластов, которые большинство ГМ являются истощенными, были выявлены при предельно допустимой депрессии на установившихся режимах. А также подтверждено, что для таких залежей разрушение стенки за-

Таблица. СОДЕРЖАНИЕ ПРОДУКТОВ РАЗРУШЕНИЯ КОЛЛЕКТОРА (ПЕСКА) И ВОДЫ В ПРОДУКЦИИ СКВАЖИН СЕНОМАНСКОЙ ЗАЛЕЖИ НА РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ
Table. The content of reservoir destruction products (sand) and water in the production of Cenomanian wells under various operating conditions

№ скв.	Рабочие параметры и режимы исследования			Определено в природе «Надым»			Конден. вода при	Минерализ. проб, г/л	Содержание пластовой и остаточной воды		
	D, мм	P _y , кг/сут	T _y , °C	Q, тысн м ³ /сут	W ^{???} , г/м ³	W _{сск.} , мг/м ³			W, г/л	P _y и T _y , г/м ³	по данным хим. анализа, %
01	22,5	75,0	15,0	722	0,12			0,270	0,874	3,4	0
	25,5	74,3	15,6	586	0,29	4,42	15,24	0,283		3,4	30,9
	28,5	73,5	15,7	731	0,10	2,36	23,6	0,272		3,4	0
	31,5	72,5	15,7	879	0,16	8,85	55,3	0,268		3,4	0
	35,0	71,4	15,7	1022	0,16	6,73	42,1	0,265		3,4	0
	22,5	75,0	15,0	1156	0,20	7,48	37,4	0,283		3,4	59
				585	0,12	2,05	24,5				3,4
Вода конденсационная с примесью пластовой или связанной остаточной воды											
02	22,5	73,7		648	0,1			0,232	0,964	3,8	0
	25,5	75,0	11,0	594	0,08	4,36	54,5	0,302		3,8	0
	28,5	71,0	14,0	734	0,07	2,35	33,5	0,251		3,8	0
	31,5	73,2	16,0	882	0,08	3,12	49,0	0,224		3,8	0
	35,0	71,9	16,0	1031	0,12	3,35	27,9	0,220		3,8	0
		69,9	16,0	1126	0,14	4,32	31,2	0,215		3,8	0
Вода конденсационная с большой примесью техногенной (раствор CaCl₂)											
03	22,5	73,7	15,2	564	0,18			0,22	0,950	3,7	13,5
	25,5	73,7	15,9	562	0,17	4,61	27,1	0,24		3,7	0
	28,5	72,7	16,0	693	0,10	6,24	62,4	0,225		3,7	0
	31,5	70,2	15,5	820	0,16	15,80	98,7	0,221		3,7	2,3
	35,0	68,2	15,2	957	0,15	13,54	90,2	0,226		3,7	0
				1076	0,28	16,06	57,3	0,225			3,7
Вода конденсационная с большой примесью пластовой или связанной остаточной воды											
04		73,7		731	0,18			0,218	0,827	3,2	14,5
	22,5	74,9	16,2	578	0,08	1,49	18,6	0,226		3,2	0
	25,5	72,9	16,4	706	0,10	1,22	12,2	0,220		3,2	0
	28,5	71,7	16,5	834	0,15	1,55	10,3	0,215		3,2	0
	31,5	71,9	16,2	968	0,20	2,68	13,4	0,217		3,2	23,3
	35,0	69,9	16,0	1108	0,28	4,68	16,7	0,216		3,2	46,4
Вода конденсационная с большой примесью техногенной (фильтрат бурового раствора, раствор CaCl₂)											

Рис. 4. График зависимости отношения удельного содержания продуктов разрушения коллектора (песка) и воды в продукции скважины от режима ее эксплуатации.

Fig. 4. Graph of the relationship between the specific content of reservoir destruction products (sand) and water in the well output and the well operating mode.

боя скважины происходит при депрессии и существенно зависит от деформационно-прочностных параметров пласта-коллектора. Эти процессы сопровождаются изменением структуры пласта и снижением коэффициента проницаемости. Увеличение скорости потока газа из пласта в совокупности с другими факторами ускоряет процесс разрушения скелета породы-коллектора [16–19]. Другой особенностью коллекторов сеноманской залежи является наличие подошвенных вод или близко расположенных к продуктивной зоне водонасыщенных пластов при незначительных слабопроницаемых перемычках. С целью выяснения степени влияния различных причин (механизмов) разрушения пласта и образования на забоях скважин осадков из песчано-глинистых разностей был проведён анализ данных исследований скважин и условий эксплуатации по эксплуатационному фонду месторождений Западной Сибири. Было установлено, что минерализация и солевой состав конденсационных вод в некоторой степени зависят от минерализации и состава остаточных и пластовых вод, с которыми в контакте находится содержащийся в пласте-коллекторе газ, а также от термобарических условий. Установлено, что на минерализацию и солевой состав паровой фазы воды влияют и размеры пор коллекторов [18–20]. При различных режимах эксплуатации скважин происходит разрушение породы пласта, а продукты разрушения коллектора (песка) и воды в продукции поступает в ПЗП (табл. 2).

Содержание выносимого из продуктивных пластов остаточной воды в составе извлекаемой жидкости может достигать 4–6%. Поступающая в ПЗП газонасыщенная остаточная вода с наибольшей депрессией дегазируется наиболее интенсивно и скорость расширения (разбегания стенок) имеет высокие значения, и микропузырьки (первая фаза кавитации) создают ударные гидродинамические нагрузки на стенки пор и каналов, разрушая, таким образом, коллектор.

Частичное удаление из сеноманского пласта-коллектора остаточной воды, например при дебитах газа в 600–1000 тыс. м³/сут, выносилось до 0,3 м³/сут смеси из конденсационной и остаточной вод. Содержание последней колебалось в пределах 3–4 %. Графики зависимости отношения удельного содержания продуктов разруше-

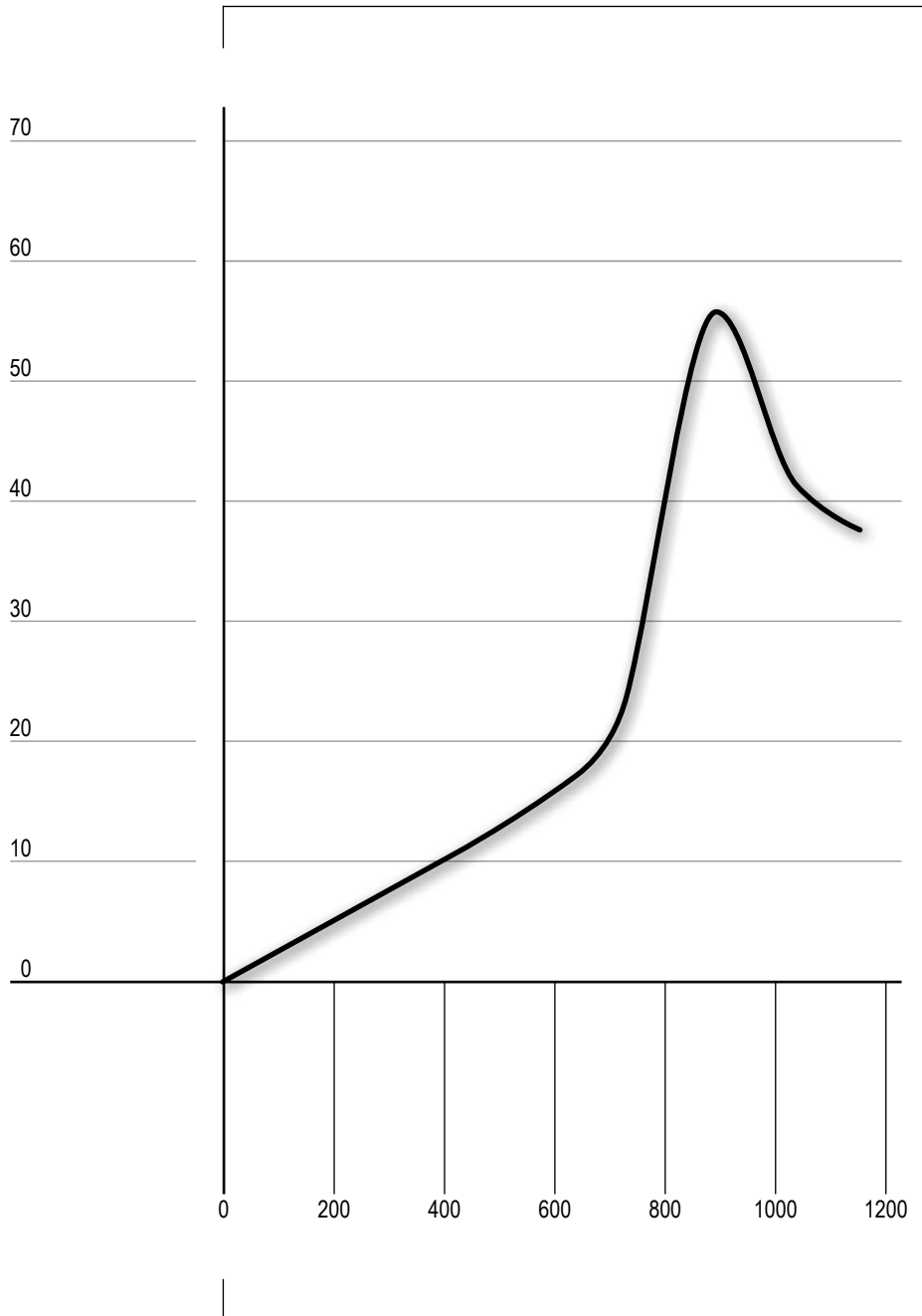


Рис. 4. График зависимости отношения удельного содержания продуктов разрушения коллектора (песка) и воды в продукции скважины от режима ее эксплуатации.

Fig. 4. Graph of the relationship between the specific content of reservoir destruction products (sand) and water in the well output and the well operating mode.

ния коллектора (песка) и воды в продукции скважин сеноманской залежи Западной Сибири от режимов их эксплуатации показывают, что по мере роста дебитов происходит увеличение интенсивности разрушения коллекторов в зависимости от содержания в продукции скважин остаточной воды (рис. 4).

Это происходит лишь до достижения определенной величины дебитов газа (600–8000 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$). Дальнейшее увеличение дебитов (до 1000 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ и более) приводит уже к снижению темпа разрушения пласта, выражающегося в уменьшении отношения удельного содержания песка и воды, выносимых вместе с газом из скважин. Эти факты свидетельствуют, что уже на режимах, обеспечивающих дебиты газа в 600–800 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ достигаются такие скорости истечения газа через поры и каналы ПЗП, что происходит «осушка» пласта, которая приводит к повышению устойчивости пород прифилтровой зоны к разрушению, что и отражается в снижении «концентрации» песка в выносимой воде, содержащей примеси пластовой и остаточной.

В результате сравнения данных гранулометрического и минералогического (микроскопического) анализов песка, выносимого из скважин в различные годы, можно сделать вывод, что по мере обработки запасов сеноманской залежи увеличивается темп разрушения продуктивного пласта.

В методическом плане полученные материалы позволяют оценивать состояние пласта и ПЗП, диагностировать наличие каверн (пустот) за колонной-фильтром, прогнозировать изменения геолого-физических параметров системы скважина-пласт в процессе разработки.

Заключение

Эксплуатация газоносных пластов повсеместно сопровождается разрушением матрицы породы-коллектора, причём наиболее опасными по своим последствиям являются разрушения, происходящие в околоскважинной зоне пласта.

Установлен механизм разрушения пласта-коллекторов при движении потоков флюидов в кольцеобразных зонах сужения каналов из-за пульсирующих гидропневмударов, которые проявляются

в пласте как отдельно, так и совместно в различных сочетаниях и являются взаимосвязанными и взаимообусловленными.

Выявлено, что ударные гидродинамические нагрузки на стенки пор и каналов провоцируют разрушения коллекторов, которым способствует поступающая в околоскважинной зоне пласта газонасыщенная остаточная вода с наибольшей депрессией, которая дегазируется наиболее интенсивно и имеет высокую скорость расширения из-за образующегося микропузырьков (первая фаза кавитации).

Неизбежными процессами, сопровождающими добычу газа и приводящими к разрушению со временем коллекторов любой прочности, являются процессы формирования и разрушения газовой эмульсии при дегазации пластовых вод любого генезиса.

Силы сцепления пузырьков газа с твёрдой поверхностью стенок пор и каналов настолько велики, что позволяет им удерживаться в сужениях пор и каналов фильтрации в неподвижном состоянии при градиентах давления в 2,0 МПа/м.

Результаты исследования по аналитическому моделированию процессов разрушения коллекторов в условиях фильтрации флюидов показали реальность существования процессов формирования микрогазовых эмульсий (микропузырьковые газожидкостные среды) и неизбежность кавитационного разрушения продуктивного пласта в течение всего времени, пока осуществляется добыча газа из залежи.

Выявлены предпосылки создания принципиально новых технических и технологических решений для диагностики состояния околоскважинной зоны пласта (оценка наличия и размеров каверн в прифилтровой части пласта), прогнозирования темпов и масштабов разрушения коллектора, которые позволяют повысить эффективность разработки продуктивной залежи и продлить эксплуатацию скважин с высокими добывными характеристиками на базовых газовых месторождениях.

Список источников

1. Гасумов Э. Р., Гасумов Р. А. Особенности цифрового фильтрационного моделирования продуктивных залежей // Наука. Инновации. Технологии. 2021. № 2. С. 7–28.
2. Gasumov R. A., Gasumov E. R., Minchenko Yu. S. Features

- of the creation of underground reservoirs in depleted gas condensate field's article // Notes of the Mining Institute. 2020. Vol. 244. P. 418-427. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.4>
3. Gasumov R. A. and others. Development of a three-dimensional geological model of the upper control horizons and near-surface sediments for investigation of the system of monitoring the tightness of the underground storage // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2022. Vol. 333 (6). P. 86–95. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/6/3739>
 4. Кю Н. Г. Особенности и проблемы флюидоразрывов породных массивов // Сибирское отделение РАН, ФТПРПИ. 2017. № 5. С. 44–56.
 5. Маврин К. А. Виды взаимодействия «флюид–порода» в процессе эволюции геогидродинамических систем осадочно-породных бассейнов // Известия Саратовского университета. 2008. Т. 8. Вып. 1. С. 50–56.
 6. Химуля В. В., Барков С. О. Исследование процессов фильтрации и разрушения в породах-коллекторах подземных хранилищ газа с использованием цифрового анализа данных компьютерной томографии // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2023. № 4. С. 234. <https://doi.org/0502-1/2340502-8>.
 7. Методика выделения и разделения по типам пустотного пространства сложных трещинно-каверново-поровых карбонатных коллекторов на основе данных керна и геофизических исследований скважин / Е. А. Зарай, М. К. Шевелева, Д. А. Локшин, А. Т. Ахмадишин // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 9. С. 64–71. <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2024-9-64-71>.
 8. Билянский К. В. Борьба с обводнением скважин // Молодой ученый. 2020. № 7(297). С. 16–18.
 9. Developing features of the near-bottomhole zones in productive formations at fields with high gas saturation of formation oil / V. I. Galkin, D. A. Martyushev, I. N. Ponomareva, I. A. Chernykh // Journal of Mining Institute. 2021. Vol. 249. P. 386-392. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.7>.
 10. Гильманова Н. В., Тарачева Е. С., Сивкова А. В. Прогноз зон наличия капиллярно-защемленной нефти для низкопроницаемых коллекторов при обосновании остаточной нефтенасыщенности различными способами // Нефтепромысловое дело. 2020. № 2 (614). С. 12–18.

11. Леденев В. В., Однолько В. Г., Нгуен З. Х. Теоретические основы механики деформирования и разрушения. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. 312 с.
12. 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>
13. Свалов А.М. Геомеханический анализ процесса разрушения призабойных зон и затрубного пространства скважин при эксплуатации подземных хранилищ газа //Актуальные проблемы нефти и газа. 2025. Том 16. № 1. С. 99–109. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2025.03>
14. On the causes of deterioration of the bottomhole formation zone and recommendations for preserving reservoir properties / G.S. Dubinsky, V.E. Andreev, F.Yu. Kanzafarov, V.S. Mukhametshin // IOP Materials Science and Engineering Conference Series. 2020. Vol. 905(1). P.012-079. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/905/1/012079>
15. Эксплуатация скважин на завершающей стадии разработки месторождений / Д. А. Кряквин, Д. А. Кустышев, М. Г. Гейхман, В. Н. Никифоров // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2010. № 4 (82). С. 28–33.
16. Аксенова Н. А., Овчинников В. П., Анашкина А. Е. Технология и технические средства заканчивания скважин с неустойчивыми коллекторами: монография. Тюмень: ТИУ, 2018. 134 с.
17. Puthalath R., Chivukula M. S., Surendranathan A. O. Reservoir formation damage during various phases of oil and gas recovery- an overview // International Journal of Earth Sciences and Engineering. 2012. No. 5(2). P. 224-231.
18. Свалов А. М. Геомеханический анализ процесса разрушения призабойных зон и затрубного пространства скважин при эксплуатации подземных хранилищ газа // Актуальные проблемы нефти и газа. 2025. Т. 16. № 1. С. 99–109. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2025.03>
19. Anyadiegwu C. I. C., Muonagor C. M. Effects of Formation Damage on Productivity of Underground Gas Storage Reservoirs //Asia Pacific Journal of Multidisciplinary Research. 2013. Vol. 1. No. 1. P. 188–197.
20. Khabibullin M. Ya. Study of the mechanism of destruction of the bottomhole formation zone by the filtration flow of formation

fluid and prevention of plug formation in the well // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2021. V. 332. 10. 86–94. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3397>

References

1. Gasumov ER, Gasumov RA. Features of digital filtration modeling of productive deposits Science. Innovations. Technologies. 2021;(2):7-28. (In Russ.).
2. Gasumov RA, Gasumov ER, Minchenko YuS. Features of the creation of underground reservoirs in depleted gas condensate field's article. Notes of the Mining Institute. 2020;(244):418-427. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.4.4>
3. Gasumov RA et al. Development of a three-dimensional geological model of the upper control horizons and near-surface sediments for investigation of the system of monitoring the tightness of the underground storage. 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>
4. Kyu NG. Features and problems of fluid fracturing of rock masses. Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, FTPRPI. 2017;(5):44-56. (In Russ.)
5. Mavrin KA. Types of fluid-rock interaction in the evolution of geohydrodynamic systems of sedimentary-rock basins. Bulletin of Saratov University. 2008;8(1):50-56. (In Russ.)
6. Khimulya VV, Barkov SO. Study of filtration and destruction processes in reservoir rocks of underground gas storage facilities using digital analysis of computed tomography data. Scientific Notes of the Physics Faculty of Moscow University. 2023; 4. <https://doi.org/2340502-1/2340502-8> (In Russ.)
7. Zaray EA, Sheveleva MK, Lokshin DA, Akhmadishin AT. Methodology for identifying and separating complex fractured-cavern-pore carbonate reservoirs by void space types based on core data and well logging. Oil Gas Exposure. 2024;(9): 64-71. (In Russ.) <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2024-9-64-71>.
8. Bilyansky KV. Combating well flooding Young scientist. 2020;7(297):16–18. (In Russ.).
9. Galkin VI, Martyushev DA, Ponomareva IN, Chernykh IA. Developing features of the near-bottomhole zones in produc-

- tive formations at fields with high gas saturation of formation oil. *Journal of Mining Institute*. 2021;249:386-392. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.7>
10. Gil'manova NV, Taracheva ES, Sivkova AV. Forecasting the presence of capillary-trapped oil zones for low-permeability reservoirs when justifying residual oil saturation by various methods. *Oil Field Engineering*. 2020;2(614):12-18. (In Russ.).
 11. Ledenev VV, Odnolko VG, Nguyen ZKh. *Theoretical Foundations of Deformation and Fracture Mechanics*. Tambov: Publishing house of "TSTU", 2013. P. 312. (In Russ.).
 12. 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. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.1.7>
 13. Svalov AM. Geomechanical analysis of the process of destruction of the bottomhole zones and annular space of wells during the operation of underground gas storage facilities. *Actual Problems of Oil and Gas*. 2025;16(1):99-109. (In Russ.). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2025.03>
 14. Dubinsky GS, Andreev VE, Kanzafarov FYu, Mukhametshin VS. On the causes of deterioration of the bottomhole formation zone and recommendations for preserving reservoir properties. *IOP Materials Science and Engineering Conference Series*. 2020;905(1):012-079. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/905/1/012079>
 15. Kryakvin DA, Kustyshev DA, Geykhman MG, Nikiforov VN. Well Operation at the Final Stage of Field Development. *News of Higher Educational Institutions. Oil and Gas*. 2010;4(82):28-33. (In Russ.).
 16. Aksenova NA, Ovchinnikov VP, Anashkina AE. *Technology and Technical Means of Completing Wells with Unstable Reservoirs*. Tyumen: TIU; 2018. P. 134. (In Russ.).
 17. Puthalath R, Chivukula MS, Surendranathan AO. Reservoir Formation Damage During Various Phases of Oil and Gas Recovery - an Overview. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. 2012;5(2):224-231. (In Russ.).
 18. Svalov AM. Geomechanical analysis of the process of destruction of bottomhole zones and annulus of wells during operation of underground gas storage facilities. *Actual problems of oil and gas*. 2025;16(1):99-109. (In Russ.). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2025.03>

19. Anyadiegwu CIC, Muonagor CM. Effects of Formation Damage on Productivity of Underground Gas Storage Reservoirs. *Asia Pacific Journal of Multidisciplinary Research*. 2013;1(1):188-197.
20. Khabibullin MYa. Study of the mechanism of destruction of the bottomhole formation zone by the filtration flow of formation fluid and prevention of plug formation in the well. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2021;332(10):86-94. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/10/3397>

Информация об авторах

Рамиз Алиджавад-оглы Гасумов – доктор технических наук, профессор, академик РАН, профессор, Северо-Кавказский федеральный университет, Scopus ID: 6507302404.

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

Юлианна Константиновна Димитриади – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Северо-Кавказский федеральный университет, Scopus AuthorID 57219180382.

Абдул-Гапур Гусейнович Керимов – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой нефтегазовой геофизики, Северо-Кавказский федеральный университет Scopus ID: 56872657000

Наталья Григорьевна Федорова – доктор технических наук, профессор кафедры строительства нефтяных и газовых скважин Северо-Кавказский федеральный университет, Scopus ID: 7102881216

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.

Юлианна Константиновна Димитриади. Проведены исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

Абдул-Гапур Гусейнович Керимов. Проведены исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

Наталья Григорьевна Федорова. Проведены исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

Information about the authors

Ramiz A. Gasumov – Dr. Sci. (Techn.), Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Professor, North-Caucasus Federal University (1, Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation), Scopus ID: 6507302404.

Eldar R. Gasumov – Cand. Sci. (Econ), Associate Professor, doctoral student Azerbaijan Technical University (25, Huseyn Javid Ave., Baku, Azerbaijan Republic), Scopus ID: 57217090200.

Yulianna K. Dimitriadi – Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Head of Department, North-Caucasus Federal University, Scopus AuthorID 57219180382.

Abdul-Gapur G. Kerimov – Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Oil and Gas Geophysics, North-Caucasus Federal University Scopus ID: 56872657000

Natalia G. Fedorova – Dr. Sci. (Tech.), Professor, the Department of Oil and Gas Well Construction, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 7102881216

Contribution of the authors

Ramiz A. Gasumov. Research was carried out – 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.

Yulianna K. Dimitriadi. Collection, interpretation and analysis of the obtained data.

Abdul-Gapur G. Kerimov. Collection, interpretation and analysis of the obtained data.

Natalia G. Fedorova. Collection, interpretation and analysis of the obtained data.



Научная статья
УДК 622.276
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.8>

ПРОМЫСЛОВО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ГОРНОЙ ПОРОДЫ НА МИКРОУРОВНЕ КОСВЕННЫМИ И ПРЯМЫМИ ИССЛЕДОВАНИЯМИ

Вячеслав Григорьевич Копченков^{1*},
Владимир Васильевич Федоренко²,
Раиса Егоровна Шестерикова³,
Владимир Сергеевич Крамаренко⁴,
Елизавета Гапуровна Керимова⁵

- ^{1, 2, 3, 4, 5} Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)
¹ vkopchenkov@ncfu.ru; <https://orcid.org/0009-0007-4962-3806>
² ms.SNGS@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3979-2602>
³ rshestrikova@ngfu.ru; <https://orcid.org/0009-0007-7683-9995>
⁴ geoshot@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-8300-7970>
⁵ elizavetakerimova11@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-9909-487X>
* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

В статье рассматриваются исследования физико-механических свойств горных пород, с целью моделирования процессов по интенсификации, изучения возможности получения качественной сети трещин при гидроразрыве пласта, а также радиоактивных элементов, являющихся индикаторами глинистости. Данные о литологическом расчленении пород по содержанию отдельных естественно-радиоактивных элементов, на основании введенного коэффициента литологической дифференциации пород K_d , отражают отношение модальных значений их гамма-активности и указывают на наибольшую разрешающую способность тория, очевидно, в силу того, что он связан с минеральной частью породы, а не с концентрацией органического вещества. K_d по урану U существенно ниже, чем по Th , по причине тесной зависимости от органического вещества. В статье рассматривается само определение «глинистость», для понимания возможности ее регистрации. В одних случаях под глинистостью понимают гранулометрическую глинистость т.е. пелитовую фракцию, независящую от минерального состава в этом случае представляется возможным определять ФЕС пород, в других случаях определение «глинистость» связана с присутствием в горной

породе глинистых минералов соответственно в них отмечается присутствие химически связанной воды. В статье также приведена методика анализа ядерного материала на порошковом дифрактометре. По результатам исследований ядра по методу рентгеновской дифрактометрии был определен фазовый состав изучаемых образцов горных пород. На основе выполненных измерений и данных промысловой геофизики были рассчитаны параметры упругой среды с целью получения исходного материала для имитационного моделирования распространения трещины при гидроразрыве пласта. В конце статьи выполнено сопоставление пористости по ядру, шламу и электрическому коротажу, отмечается их высокая сходимость.

Ключевые слова: глинистые породы, дифрактометр, коэффициент пористости, параметры упругой среды, минералы.

Для цитирования: Промыслово-геологический анализ минеральной неоднородности горной породы на микроуровне косвенными и прямыми исследованиями / В. Г. Копченков, В. В. Федоренко, Р. Е. Шестерикова, В. С. Крамаренко, Е. Г. Керимова // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 4. С. 175–204. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.8>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.06.2025;
одобрена после рецензирования 20.11.2025;
принята к публикации 14.12.2025.

2.8.4. Development and operation of oil and gas fields (technical sciences) Research article

Industrial geological analysis of mineral heterogeneity of rocks at the micro-level using indirect and direct research

**Vyacheslav G. Kopchenkov^{1*},
Vladimir V. Fedorenko²,
Raisa E. Shesterikova³,
Vladimir S. Kramarenko⁴,
Elizaveta G. Kerimova⁵**

^{1, 2, 3, 4, 5} North-Caucasus Federal University (1, Pushkin Street, Stavropol, 355017, Russian Federation)

¹ vkopchenkov@ncfu.ru; <https://orcid.org/0009-0007-4962-3806>

² ms.SNGS@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3979-2602>

- ³ rshestrikova@ngfu.ru; <https://orcid.org/0009-0007-7683-9995>
⁴ geoshot@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0006-8300-7970>
⁵ elizavetakerimova11@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-9909-487X>
* Corresponding author

Abstract.

This article examines physical and mechanical properties of rocks with the aim of modeling intensification processes and exploring the feasibility of producing a high-quality fracture network during hydraulic fracturing. It also examines radioactive elements as indicators of clay content. Data on the lithological dissection of rocks based on the content of individual naturally occurring radioactive elements, based on the introduced lithological differentiation coefficient K_d , reflect the ratio of their modal gamma activity values and indicate the highest resolving power of thorium, apparently due to its association with the mineral component of the rock rather than the concentration of organic matter. The K_d for uranium (U) is significantly lower than for Th due to its close dependence on organic matter. The article examines the definition of 'clayiness' to understand its possible recording. In some cases, clayiness refers to the granulometric clay content, i.e. the pelitic fraction, independent of mineral composition, in which case it is possible to determine the reservoir properties of rocks. In other cases, the definition of 'clayiness' is associated with the presence of clay minerals in the rock, which, accordingly, indicates the presence of chemically bound water. The article also presents a method for analyzing core material using a powder diffractometer. Based on core X-ray diffractometry data, the phase composition of the rock samples was determined. Based on these measurements and field geophysics data, elastic parameters were calculated to provide the initial data for simulating fracture propagation during hydraulic fracturing. At the end of the article, porosity data from core, cuttings, and electrical logging are compared, demonstrating high convergence.

Keywords:

clay rocks, diffractometer, porosity coefficient, elastic medium parameters, minerals.

For citation:

Kopchenkov VG, Fedorenko VV, Shesterikova RE, Kramarenko VS, Kerimova EG. Field Geological Analysis of Mineral Heterogeneity of Rocks at the Micro-level Using Indirect and Direct Research. Science. Innovations. Technologies. 2025;(4):175–204. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.4.8>

Conflict of interest:

the authors declare no conflicts of interest.

The article was submitted 10.06.2025;
approved after reviewing 20.11.2025;
accepted for publication 14.12.2025.

Введение

Для исследования физико-механических свойств горных пород с целью моделирования процессов по интенсификации, изучения возможности получения сети трещин при гидроразрыве, следует на первом этапе исследований косвенными (или прямыми) методами максимально достоверно определить литологию горных пород. Литология пород позволит выполнить расчёт модуля сдвига. Модуль сдвига характеризует способность породы сопротивляться сдвиговой деформации. Одним из путей определения литологии горных пород являются методы промысловой геофизики, такие как каротаж потенциалов самопроизвольной поляризации, гамма каротаж-спектрометрический, литолого-плотностной гамма-гамма каротаж и акустический каротаж. Для изучения литологии глинистых пород палеогенового возраста одного из месторождения **В** авторы считают наиболее эффективным методом промысловой геофизики – гамма каротаж-спектрометрический (ГК-С), позволяющий расчленить геологический разрез по минералогическому составу глинистых пород.

Материалы и методы исследований

Опуская вопрос генезиса радиоактивности глин, который детально описан в монографии «Хадумиты Предкавказья: новое в геолого-геофизическом изучении, вторичном вскрытии и освоении» [1], уделим основное внимание соотношениям следующих основных радиоактивных элементов друг к другу: урана U, изотопа калия K^{40} и тория Th.

Основным прямым индикатором глинистости в изучаемых палеогеновых отложениях является торий – элемент, отражающий минеральную часть горной породы, на который не оказывает влияние общее содержание органического вещества в породе.

Результаты, отражающие литологическое расчленение горных пород палеогенового возраста по содержанию отдельных естественно-радиоактивных элементов по данным ГК-С, представлены в таблице 1 [1].

Таблица 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛИТОЛОГИЧЕСКОГО РАСЧЛЕНЕНИЯ ПОРОД ПО СОДЕРЖАНИЮ ОТДЕЛЬНЫХ ЕСТЕСТВЕННО-РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
Table 1. Results of lithological dissection of rocks based on the content of rare naturally occurring radioactive elements

Состав литологических типов	Коэффициент литологической дифференциации, Кд		
	по общей гамма-активности, Q	по U	по Th
Глина не известковая – глина слабо известковая	1,02	1,33	1,3
Глина не известковая – глина известковая	1,1	1,0	1,8
Глина известковая – мергель	1,4	1,2	2,0
Мергель – известняк	1,73	1,4	3,8
Глина не известковая – известняк	2,56	1,2	13,4

Источник: составлено по данным [1].
Source: compiled according to data [1].

Анализируя информацию о степени дифференциации геологического разреза по литологии методом ГК-С, представленную в таблице 1, заключаем, что на основании введенного коэффициента литологической дифференциации пород Кд, отражающего отношение модальных значений (излагается сообщаемое как реальный и достоверный факт) их гамма-активности, наибольшей разрешающей способностью обладает торий, очевидно, в силу того, что он связан с минеральной частью породы, а не с концентрацией органического вещества. Кд по U существенно ниже, чем по Th, по причине тесной зависимости от органического вещества.

Метод ГК-С основан на анализе естественного γ -излучения глинистых горных пород по содержанию в них основных радиоактивных элементов. Массовые содержания K^{40} , U, Th можно выделить из суммарного γ -излучения, поскольку указанные элементы имеют неодинаковые энергии излучения (рис. 1). Из энергетическо-

го спектра интенсивности гамма-излучения резонансные пики в полосе высоких энергий распределяются следующим образом:

$K^{40} - 1,46$; $Th - 2,62$; U (или U/Ra) – $1,76$ МэВ [2].

Калий имеет три изотопа – K^{30} K^{40} K^{41} , единственным нестабильным изотопом калия является K^{40} с моно-излучением с энергией $1,46$ МэВ.

Два других элемента имеют несколько спектров естественного гамма излучения, поэтому для дифференцированной записи спектров используют несколько энергетических окон.

Следует отметить, что для качественной записи данных методом ГК-С необходимо особое внимание уделять не только калибровке прибора на аттестованных моделях, но и пользоваться процедурой, позволяющей исключать аддитивную погрешность. Аддитивная погрешность остается постоянной при изменении измеряемой входной величины. Графически она выражается в постоянном смещении нулевого отсчета средства измерений.

Для исключения аддитивной (сдвиг относительно нуля) погрешности следует применять процедуру стандартизации кривых по опорным пластикам по формуле (1):

$$\Delta I = (I - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}), \quad (1)$$

где ΔI – двойной разностный параметр против исследуемого пласта;

I – показания по кривой ГК против изучаемого пласта;

I_{\min} – показания по кривой ГК в чистых песчаниках;

I_{\max} – показания по кривой ГК в глинах.

В заключение следует рассмотреть само определение «глинистость» для понимания возможности ее регистрации. В одних случаях под глинистостью понимают гранулометрическую глинистость, т.е. пелитовую фракцию, независимую от минерального состава, в этом случае представляется возможным определять ФЕС пород, в других случаях определение «глинистость» связано с присутствием в горной породе глинистых минералов, соответственно, в них отмечается присутствие химически связанной воды.

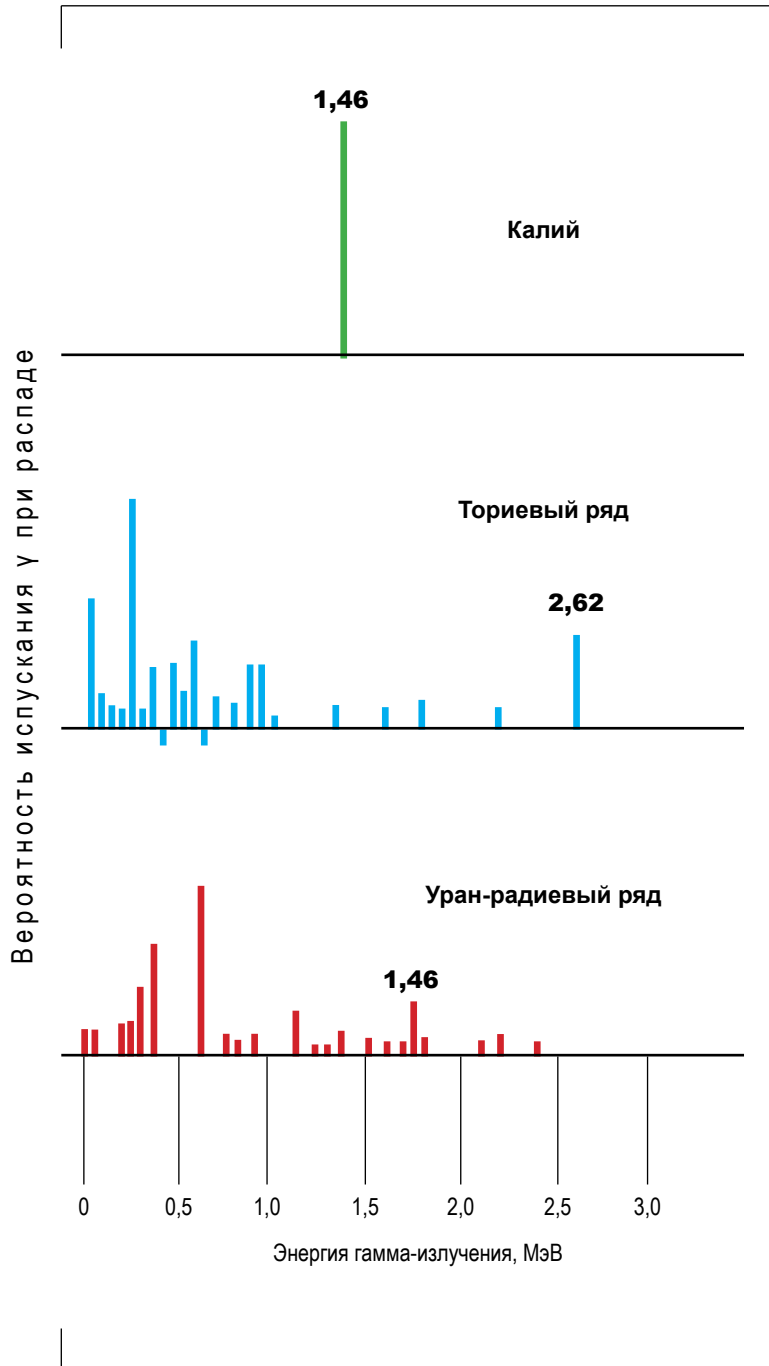


Рис. 1.

Спектры гамма-излучения радиоактивных элементов.

Источник:
Source:

Fig. 1. Gamma radiation spectra of radioactive elements
составлено по данным [1].
compiled according to data [1].

Торий Th является прямым индикатором объемной глинистости, так как он связан с минеральной частью породы. Глинистость по Th может использоваться для оценки ФЭС изучаемых отложений и носит название гранулометрическая глинистость.

Содержание изотопа калия K^{40} в изучаемых отложениях за счет повышенного содержания гидрослюд, соответственно, значительное содержание калия, определяет глинистость по калиевому индикатору как минеральная глинистость. Содержание калия, урана и тория в глинистых минералах в процентном соотношении представлены в таблице 2.

Таблица 2. СОДЕРЖАНИЕ КАЛИЯ, УРАНА И ТОРИЯ В ГЛИНИСТЫХ МИНЕРАЛАХ В %
Table 2. Content of potassium, uranium and thorium in clay minerals in %

Порода, минерал	K^{40}	U	Th
Боксит	–	$3 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3} - 1,3 \times 10^{-2}$
Глауконит	5,08–5,30	–	–
Бентонит	$\leq 0,5$	$1 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-3}$	$6 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-3}$
Монтмориллонит	0,16	$2 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-3} - 2,4 \times 10^{-3}$
Каолинит	0,42	$1,5 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-4} - 1,9 \times 10^{-3}$
Иллит	4,5	$1,5 \times 10^{-4}$	–

Источник: составлено по данным [1].
Source: compiled according to data [1].

Результаты исследований и их обсуждение

Из анализа данных промыслово-геологических исследований следует, что применение большого количества методов промысловой геофизики применительно к палеогеновым отложениям может давать противоречивые результаты при выделении глинистых пород. В противоположность этому ГК-С, при учете различных соотношений содержания в породе радиоактивных элементов, привносит наиболее достоверную информацию по минералогическому составу глинистых пород.

Однако когда исследования скважин методом ГК-С не выполняются в должном объеме, или получаемый материал носит не представительный характер, для выполнения детального анализа

минерального состава горной породы следует использовать результаты анализа керна на микроуровне, например, на порошковом дифрактометре.

Рассмотрим методику анализа кернового материала, отобранного в скважинах месторождения В, вскрывших глинистые породы палеогенового возраста на порошковом дифрактометре. Для получения качественного результата анализа кернового материала, представленного глинистым материалом, следует строго придерживаться последовательности отдельных операций [3, 4].

1. Подготовка образца к измерению

Для подготовки образца к измерению выполнялась следующая последовательность действий:

- отрезать или отломить необходимую для съемки часть образца горной породы – керна;
- измельчить в мельнице образец до размера частиц менее 10 мкм;
- для глинистых пород измельчение выполняется дважды, первый раз с добавлением спирта, при этом образуется консистенция, схожая с жидкой глиной. После высыхания выполняется повторное измельчение пробы;
- смочить спиртом чистую салфетку из бязи и обезжирить (протереть) все поверхности кюветы для образца. На руках должны быть надеты резиновые перчатки во избежание загрязнения поверхности;
- поместить кювету для образца на твердую, чистую, гладкую, ровную поверхность;
- насыпать порошковый образец внутрь кюветы до образования небольшой горки;
- наложив на порошок приспособление для уплотнения, слегка покачивая и постепенно увеличивая давление, запрессовать порошок внутрь кюветы;
- переместить остатки порошка с боковых граней кюветы внутрь, при необходимости добавить еще порошкового образца и повторить процедуру прессования. Повторять вышеописанные процедуры

следует выполнять до тех пор, пока порошковый образец внутри кюветы не будет плотно и равномерно спрессован.

После подготовки образца к измерению кюветы устанавливаются в приставку для образцов. Учитывая нюансы подготовки глинистых образцов и расположив кюветы внутри порошкового дифрактометра выполняются съемки спектра рентгеновской дифракции.

Рентгенофазовый анализ (РФА) позволяет определять в исследуемых образцах присутствие минералов, однако определение их количества невозможно.

При регистрации дифрактограмм итоговый результат формируется путем наложения дифрактограмм отдельных соединений, при этом положение рефлексов, отдельных фаз не меняется, а относительная интенсивность зависит от содержания в смеси фаз.

Сравнивая положение и интенсивности рефлексов на экспериментальной дифрактограмме с дифрактограммами индивидуальных соединений, можно определить наличие или отсутствие того или иного минерала в смеси.

2. Интерпретация результатов рентгеновской дифракции

Интерпретацию результатов рентгеновской дифракции выполняют в программном комплексе CSM (Crystallographica Search-Match), с помощью которого автоматически производится качественный фазовый анализ с использованием базы данных ICDD PDF-2. Вначале выполняется визуальная оценка качества определения пиков на рентгенограмме. При необходимости осуществляется удаление неверно определенных пиков или добавление не определенных пиков, учитывая, что дифракционным пиком можно считать такой пик, для которого выполняется следующее соотношение (2):

$$I_{\text{п}} - I_{\text{ф}} > 3 \left(\sqrt{I_{\text{п}}} + \sqrt{I_{\text{ф}}} \right), \quad (2)$$

где $I_{\text{п}}$ — интенсивность пика, количество импульсов;
 $I_{\text{ф}}$ — интенсивность фона, количество импульсов.

Затем выполняется поиск пиков по базе данных. По результатам поиска выясняется присутствие в смеси того или иного минерала. В частности, для нашего случая определяется наличие в смеси глинистых минералов и микропримесей.

3. Определение фазового состава образцов горных пород

При определении фазового состава образцов горных пород выполняются следующие операции:

- проводится сравнение рентгенограммы исследуемого образца с эталонной рентгенограммой из базы ICDD PDF-2. Если все дифракционные линии экспериментальной рентгенограммы совпадают с линиями рентгенограммы сравнения, а их угловое положение отличается незначительно, то заключают, что фаза присутствует в пробе образца горной породы.

Результаты исследований кернового материала, отобранного в скважинах, месторождения **В** зоны нефтегазоаккумуляции (рис. 2, 3, 4, 5) в интервале залегания глинистых пород палеогенового возраста сведены в таблицу 2.

Важно отметить, что при анализе на микроуровне одного и того же геологического объекта возможно получить не схожие, порой противоречивые результаты. С таким примером пришлось столкнуться авторам. В качестве примера ниже приводятся результаты визуального изучения одного из образцов керна, отобранного в одной из скважин месторождения **В** на глубине 2105 м. Отмечается, что с различных сторон наблюдается существенное разнообразие структуры образца и состав включений в образец (рис. 2).

На рисунке 3 в левой части керна после увеличения более чем в 4 раза видны следы осаждения кристаллов солей. Вероятно, этот процесс происходил в перенасыщенном растворе морской воды. С точки зрения литификации формирование аргиллита и алевролита происходит в морской среде. Однако если большая часть исследуемого объекта состоит из кварца (80% кварца в верхней и в ниж-

Таблица 3. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КЕРНА ПО МЕТОДУ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДИФРАКТОМЕТРИИ, В %
Table 3. Some results of core studies using X-ray diffractometry, in %

Образцы	Кварц	Каолинит	Мусковит	Ярозит	Иллит	Козсит	Кронстедтит	Доломит	Кальцит	Кронстедтит	Глинистость
скв. 5, 2100–2115 верх	80	+	+								+
скв. 5, 2100–2105 низ	80		+	+					15		+
скв. 5, 2120–2125 верх	80	+			+						+
скв. 21, 2065–2075	80		+	+		+		+			+
скв. 21, 2072–2078 середина	80			+		+	+	+	+		+
скв. 5, 2110–2115 низ	10							90			
скв. 5 2120–2125 низ	20								75		
скв. 5, 2100–2105 низ	60								+		
скв. 5, 2120–2125 низ	50								+		
скв. 5, 2110–2115 верх/середина	70		+						15	+	+
скв. 21, 2195–2200	90							+	+		+

+ присутствие примесей в горной породе в количестве от 3 до 5 %.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

ней частях отобранных образцов), горную породу вероятно следует отнести к алевролиту.

На фотографии торцевой части образца этого керна четко прослеживается микрослоистость, указывающая нам о спокойной гидродинамике, существовавшей во время осадконакопления (рис. 4). Вероятно, осадконакопление происходило в относительно спокойных условиях, где мелкие частицы могут оседать из транспортной среды (воздуха или воды) и накапливаться на поверхности.

Но наиболее интересным является тыльная сторона образца, на которой отчетливо видно включение инородного материала в тело горной породы (рис. 5). Выполненный анализ образца с тыльной стороны указывает на наличие в массе керна кварца около 80% от полного объема темно серого цвета. Выявленное включение, состо-



Масштаб полоски в нижнем правом углу 10 мм

Рис. 2.

Образец керна вид спереди, отобранного с глубины 2105 м скважина №5 месторождение В.

Fig. 2. Front view of a core sample taken from a depth of 2105 m Well №5, Field B.

Источник:

составлено авторами.

Source:

compiled by the authors.



Рис. 3.

Левая часть керна того же образца после увеличения более чем в 4 раза.

Fig. 3. Left side of the core of the same sample after magnification more than 4 times.

Источник:

составлено авторами.

Source:

compiled by the authors.

ящее из цельного кусочка минерала кальцита светлого цвета, занимает 15 %.

Большинство отобранных образцов керна имели схожие включения светлого цвета, представленные кальцитом, но гораздо меньших размеров. Отмечено также, что большинство изучаемых образцов керна имеют рыхлую неплотную, трещиноватую структуру (рис. 5).

Некоторые различия между аргиллитом и алевролитом.

Какими физико-химическими свойствами обладает аргиллит:

- твердость – 3,5–4 по шкале Мооса;
- плотность – 1,3–2,6 г/кв. см;
- цвета – черный, белый, синевато-серый.

Алевролит имеет другие физико-химические характеристики:

- твердость – до 6 по шкале Мооса;
- плотность – 1,8–2,6 г/кв. см;
- цвета – серый, бурый, красный, зеленый.

Визуальный анализ образца керна, исследованного с различных сторон, выявляет чередование микрослоистости со значительной неоднородностью (анизотропией). Исходя из этого логичным является продолжение исследований для изотропных и анизотропных образцов, то есть понятие изотропные и анизотропные образцы условное.

Для изотропных и анизотропных образцов (тел) механические свойства действуют и определяются на уровне отдельных атомов и молекул. Для сопоставления прочностных свойств однотипных пород были отобраны образцы для анализа с различным содержанием примесей.

Первый образец по данным анализа кернового материала по минеральному составу на микроуровне включает в себя кварц в качестве основного минерала, а также минералы и примеси: ярозит, коэсит, кронстедтит, доломит, кварцит и глинистые минералы. Второй образец представляет собой породу у которого в качестве основного минерала также кварц, но из примесей присутствует только кальцит.

Вначале по кальциметру определили карбонатность образцов, затем исследовали их прочность на растяжение и сжатие.

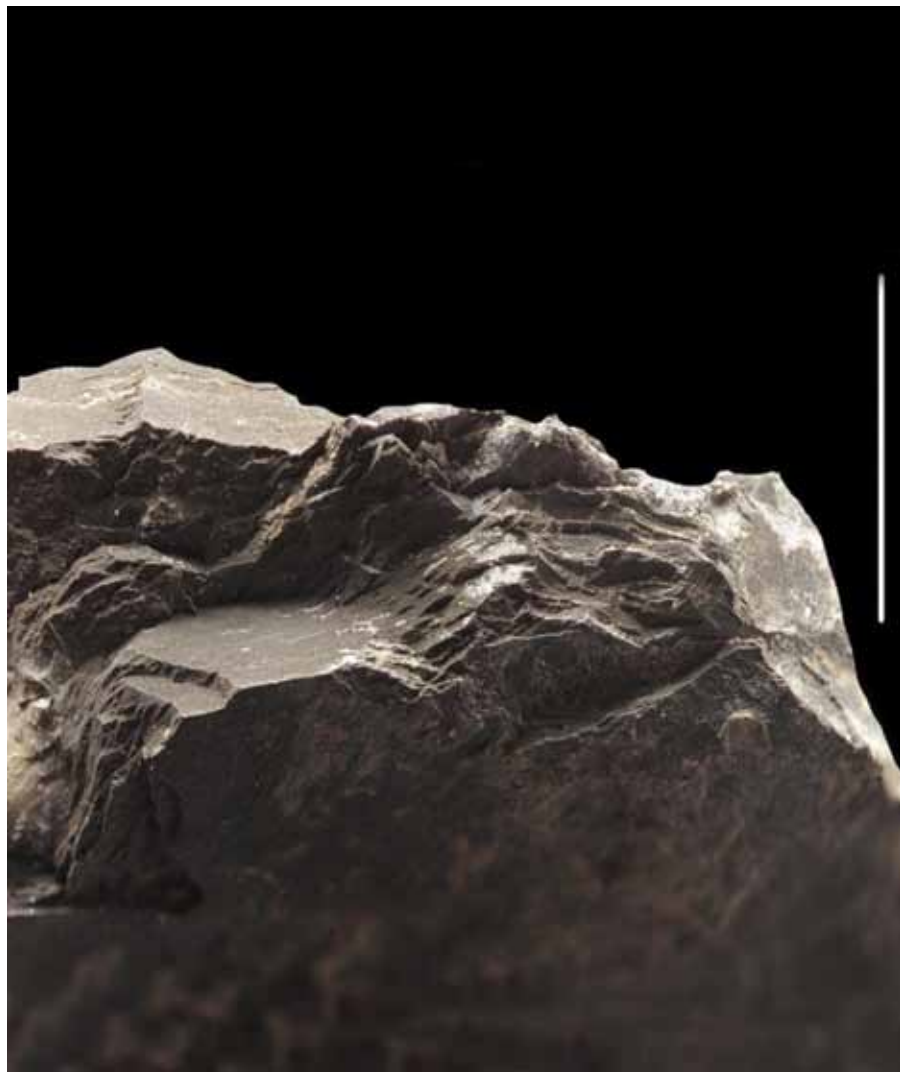


Рис. 4.

Торцевая часть того же самого керна увеличенная в 2,5 раза.

Источник:
Source:

Fig. 4. The end part of the same core enlarged 2.5 times.
составлено авторами.
compiled by the authors.

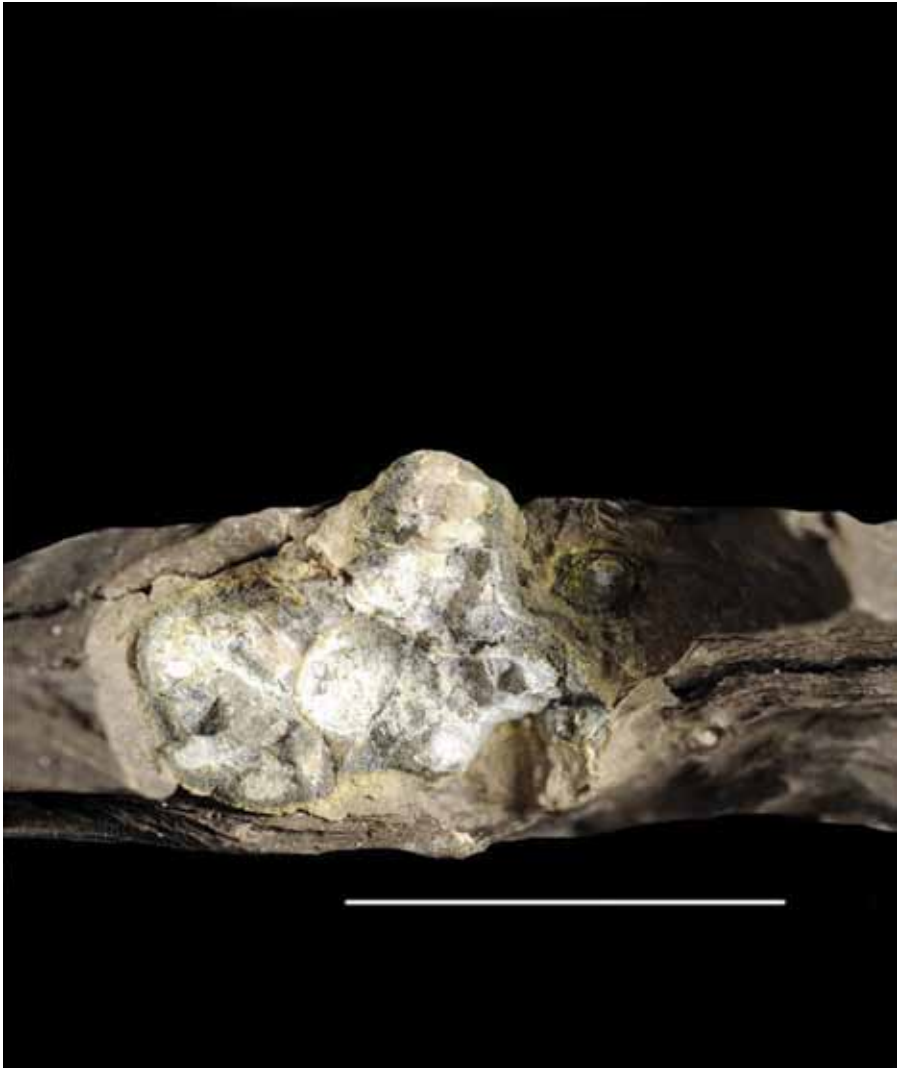


Рис. 5.

Источник:
Source:

Тыльная сторона того же образца, увеличенная в 3 раза.

Fig. 5. The back side of the same sample, enlarged 3 times.
составлено авторами.
compiled by the authors.

Карбонатность первого из образцов, определенная на кальциметре OFITE, возможно охарактеризовать как низкая. У этого образца, отобранного в скважине №21 месторождения **В** (пятая строчка таблица 2) карбонатность составляет – 1,12 %, одновременно определялось содержание кальцита и доломита в образце, содержание кальцита равно 0,58 %; доломита – 0,54 %. Для этого же образца выполнялись исследования по определению прочности на растяжение и сжатие в МПа методом разрушения образцов произвольной формы встречными сферическими инденторами в испытательной лаборатории ООО «ГеоСтройПроект». Определено, что прочность образца на растяжение составляет 1,12 МПа, а прочность на сжатие 17,9 МПа, при производимой предельной нагрузке – 0,710 кН.

Второй образец отобранный в той же скважине №21 месторождения **В** но в другом интервале (одиннадцатая строчка таблица 2). Отобранный образец возможно охарактеризовать как изотропный (присутствие примесей в горной породе отмечается в количестве менее 10 %) карбонатность составляет – 5,7 %, одновременно определялось содержание кальцита и доломита в пробе, содержание кальцита равно 4,09 %; доломита – 1,61 %. Определено, что прочность образца на растяжение составляет 2,16 МПа, а прочность на сжатие 34,56 МПа, при предельной нагрузке – 1,309 кН.

Таким образом, анизотропная горная порода, содержащая разнообразными примеси (слюды, кальцит, доломит и др.) обладает пониженной степенью прочности по сравнению с условно изотропной породой, обладающей повышенной степенью прочности.

Моделирование неоднородной среды имеет бесспорное преимущество в случае, когда исследуются все возможные составные элементы горной породы. Пустотное пространство, трещины, кавернозные полости, содержание разнообразных примесей, а также минеральный состав скелета горной породы включая размеры минеральных зёрен [5, 6, 7, 8]. Имея информацию о минеральном составе скелета горной породы следует индивидуально изучить механические свойства образцов минералов, слагающих каркас горной породы. Трещина, формирующаяся при гидроразрыве пласта (ГРП) возникает в ореоле минералов, обладающих наиболее слабыми упруго-прочностными параметрами [9, 10]. Важную роль при

исследованиях прочностных свойств каркаса горной породы является геометрия контактов между минералами [11, 12]. Предпочтительно для исследования таких горных пород иметь функцию микро-профилирования [13, 14, 15, 16].

В случае отсутствия возможности объемного изучения минерального состава образцов горной породы предлагается распределить при объемном моделировании упругие механические параметры на основе расчетных данных модуля Юнга и коэффициента Пуассона по данным промысловой геофизики методом широкополосной акустики (АКШ) с дифференциальным учетом содержания различных минералов в изучаемой породе и пористости горной породы.

Таким образом, исходными материалами для имитационного моделирования распространения трещины при ГРП в условиях трехосного сжатия образца являются: *упругопрочные свойства минералов*, слагающие скелет горной породы, упругие механические параметры – модуль Юнга и коэффициент Пуассона и пористость горной породы.

В данной статье описана процедура выполненного анализ керна по методу рентгеновской дифрактометрии с целью выявления присутствия в горной породе примесей, оказывающих влияние на прочностные свойства породы.

Упругие механические параметры – коэффициент Пуассона и модуль Юнга возможно, оперативно и точно рассчитать по скоростям продольной и поперечной волн в интересующем интервале скважины по методу АКШ по формулам (3, 4).

$$\nu = \frac{V_P^2 - 2V_S^2}{2(V_P^2 - V_S^2)}, \quad (3)$$

где ν – коэффициент Пуассона;
 V_P – скорость распространения продольной волны;
 V_S – скорость распространения поперечной волны.

$$E = \frac{\nu V_S^2 (3V_P^2 - 4V_S^2)}{(V_P^2 - V_S^2)}, \quad (4)$$

где E – модуль Юнга.

По скоростям двух волн методами АКШ авторами были рассчитаны важнейшие параметры упругой среды, такие как: коэффициент Пуассона ν (кривая POIS) – упругая константа, величина отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению пород и модуль Юнга (кривая E), характеризующий способность геологического объекта сопротивляться деформациям растяжения или сжатия рисунок 6 [17].

Получение обоснованных расчетных данных об упругих механических параметрах – основа выбора технологии ГРП. В этом случае возможно получения качественной искусственной трещины для повышения нефтеотдачи низкопроницаемых глинистых коллекторов [18, 19].

Для определения емкостных свойств пласта-коллектора возможно использовать относительно большое количество методов промысловой геофизики [20]. В частности, нейтрон-нейтрон каротаж по над-тепловым нейтронам (ННК-НТ), так как показания этого метода мало зависят от литологического состава горных пород. Однако авторы предлагают для определения коэффициента пористости в низкоомном разрезе использовать безопасный с точки зрения радиации метод электрического каротажа (индукционный каротаж). Выполненное сопоставление пористости по керну, шламу и электрическому каротажу в изучаемых отложениях палеогенового возраста показали высокая сходимость результатов (рис. 7).

Распределение пористости, определенной по керну и электрическому каротажу для отложений палеогенового возраста в над-реперной и под-реперной частях в баталпашинской свите подтвердили выявленную выше закономерность совпадения пористости по керну и электрическому каротажу (рис. 8).

Причем в над-реперной части баталпашинской свиты значения пористости, определенной по керну и индукционному каротажу, совпадают практически полностью. Однако, в под-реперной части свиты показания не значительно, но расходятся. Пористость, рассчитанная по $\rho_n^{ИК}$ максимум на 2% ниже пористости определенной по керну.

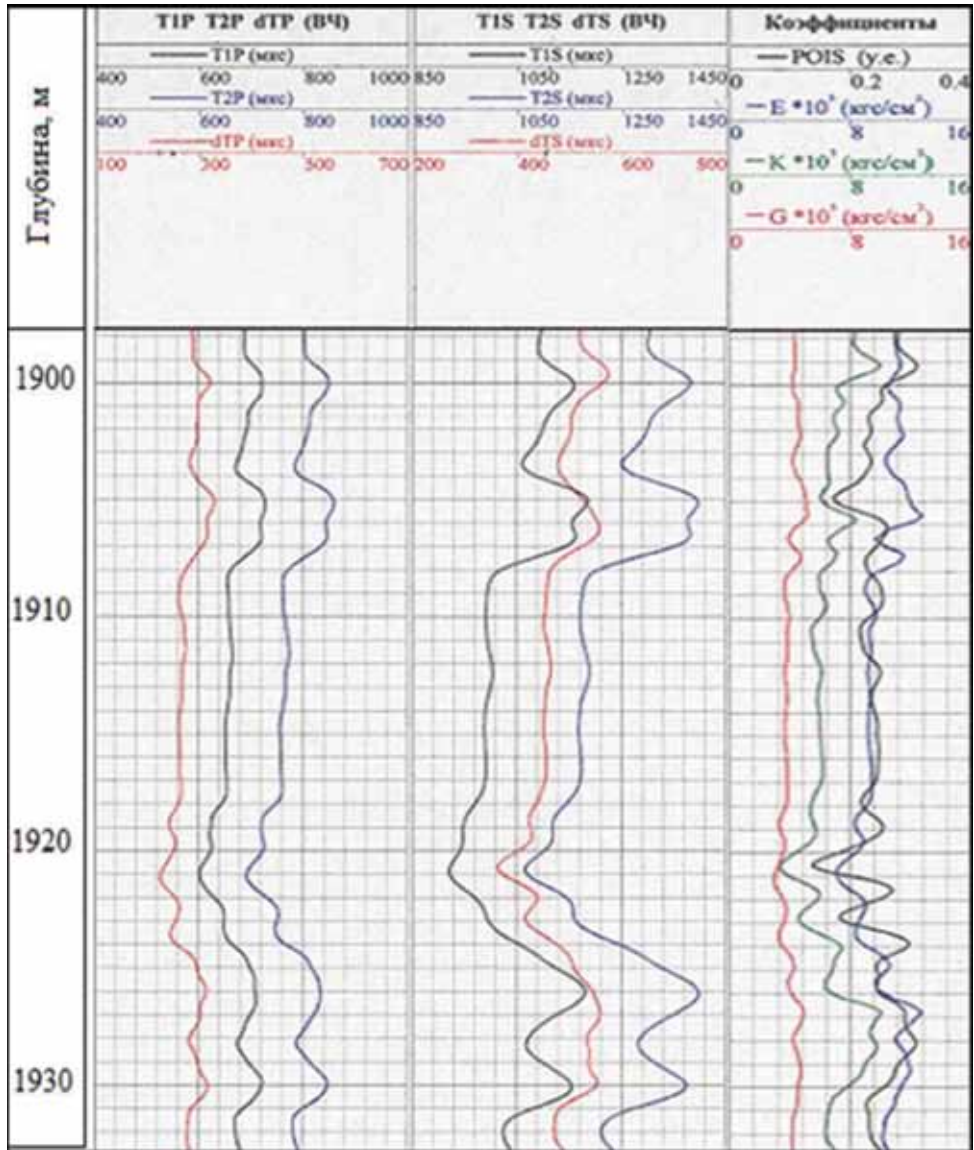


Рис. 6.

Фрагмент диаграммы широкополосной акустики.

Fig. 6. Fragment of a broadband acoustics diagram.

Источник:

составлено авторами.

Source:

compiled by the authors.

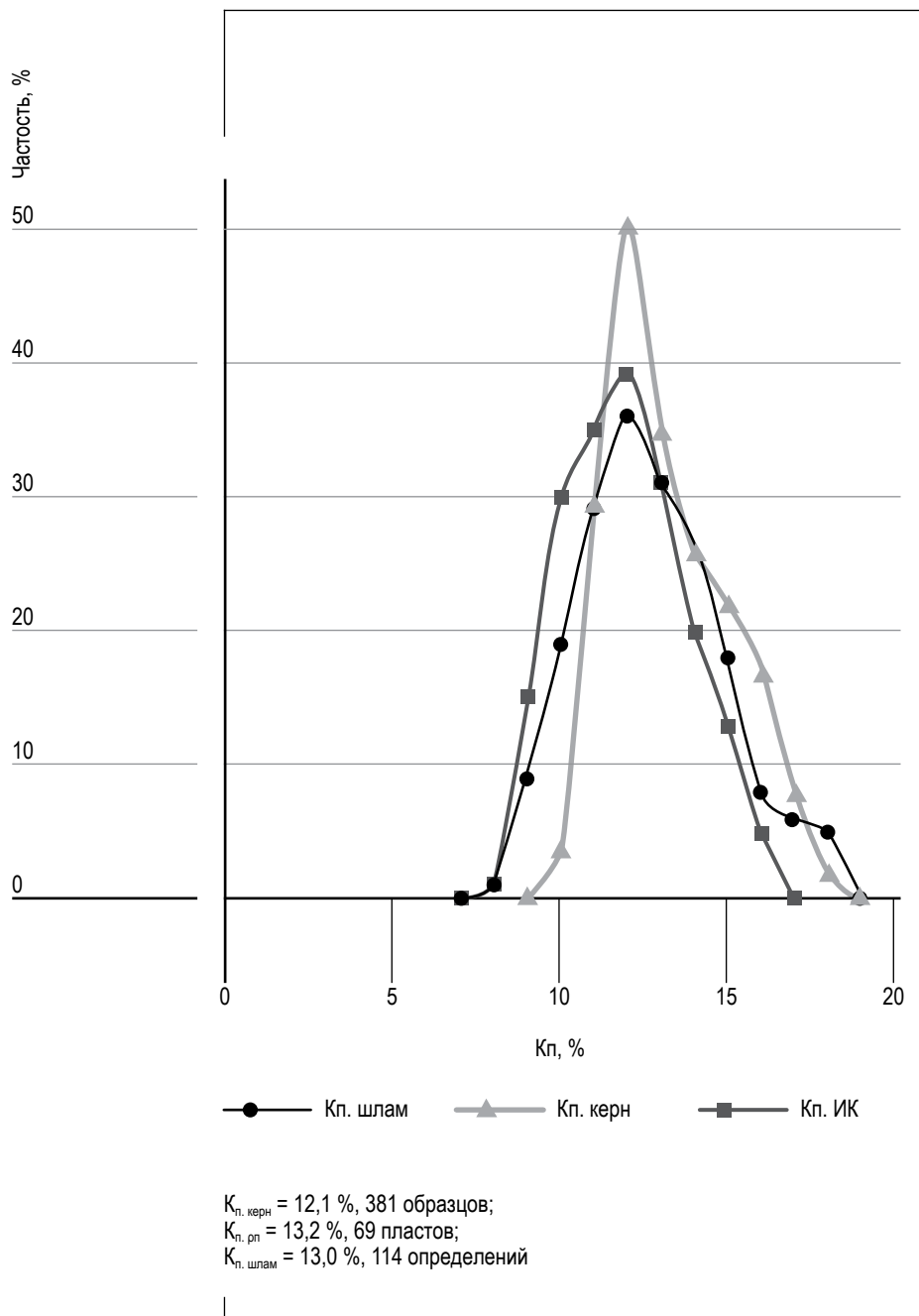


Рис. 7.

Сопоставление пористости по керну, шламу и электрическому каротажу в отложениях палеогенового возраста.

Fig. 7. Comparison of porosity from core, cuttings, and electrical logging in Paleogene sediments.

Источник:

составлено авторами.

Source:

compiled by the authors.

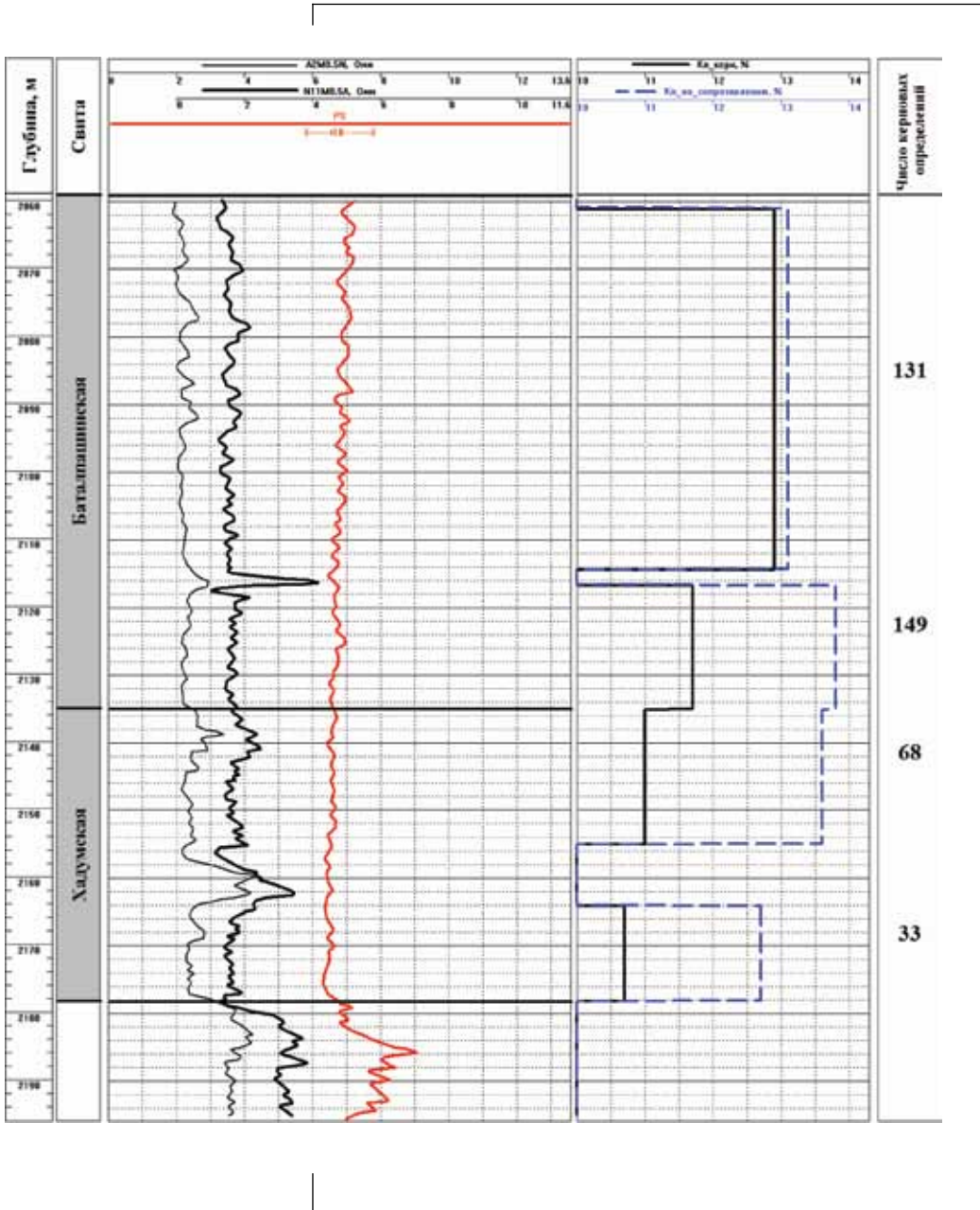


Рис. 8. Распределение пористости, определенной по керну и электрическому каротажу для отложений палеогенового возраста в одной из скважин месторождения В.

Fig. 8. Distribution of porosity determined from core and electrical logging for Paleogene deposits in one of the wells at field B.

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

Заключение

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. При рассмотрении понятия глинистости и сопоставлении его с точки зрения классификации обломочных пород следует, что глинистыми породами называют горные породы, состоящие из частиц размером менее 0,002 мм, а цементированные глинистые породы – аргиллитом. Породы, состоящие из обломков диаметром от 0,05 до 0,002 мм относятся к алевролитам в цементированном состоянии это – алевролит в которых, содержатся преимущественно частицы кварца и других минералов. Следовательно, исходя из результатов исследований керна на порошковом дифрактометре можно констатировать, что большинство исследованных образцов относятся к алевролитам, так как содержание кварца в образцах в среднем около 80 %.
2. В исследуемых образцах отмечается значительное разнообразие как размеров обломков, так и их состав.
3. Часто отмечаются трещины, приуроченные к различным минеральным ассоциациям за счет чередования микрослоистости с неоднородностью, что в итоге приводит к низкой степени прочности.
4. Расчетные параметры упругой среды по данным АКШ получаемых в интервале исследований при фактических значениях давления и температуры, поэтому расчетные параметры будут иметь относительно высокую достоверность.
5. На фактическом материале показана высокая сходимость результатов определения коэффициента пористости по электрическому каротажу, керну и шламу в изучаемых отложениях палеогенового возраста.

Список источников

1. Дудаев С. А. Хадумиты Предкавказья: новое в геолого-геофизическом изучении, вторичном вскрытии и освоении / С.А. Дудаев, Р.С. Дудаев. М.: Изд. Геоинформмарк, 2015. 204 с.
2. Керимова Е. Г. Исследования возможности применения имитационного моделирования для изучения глинистых коллекторов / Е. Г. Керимова, А. О. Шестерень, А. И. Мушегова, П. Д. Хаванов. Инновационные технологии в нефтегазовой отрасли. Проблемы устойчивого развития территорий: Сб. трудов II Международной научно-практической конференции. Ставрополь: Бюро новостей, 2021. С. 55–59.
3. Керимова Е. Г. Интерпретация результатов рентгеноструктурного анализа образцов горных пород на примере нефтяных месторождений Волгоградской области / Е. Г. Керимова, Е. В. Соколенко, А. Г. Салтанова, А. Г. Г. Керимов. Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа: Сб. материалов IX Всероссийской научно-технической конференции. Том IX. М.: ИИЕТ РАН, 2019. С. 252–258.
4. Спектр типов пор и сетей в глинистых породах и описательная классификация пор, связанных с матрицей глинистых пород / RG Loucks, RM Reed, SC Ruppel, U. Hammes // AAPG Bull. 2012. V. 96. No. 6. P. 1071–1098.
5. Perkins T. K. Width of hydraulic fractures / T. K. Perkins, L. R. Kern. Soc. Petrol. Engr. JPT, Sept. 1961. P. 937–949.
6. Strubhar M.K. Multiple, Vertical Fractures From an Inclined Wellbore – A Field Experiment / Journ. Petr. Technol. 1975, May. pp. 641–647.
7. Джарви Д. М. Системы сланцевых ресурсов нефти и газа: Часть 1. Системы ресурсов сланцевого газа. Сланцевые резервуары // Гигантские ресурсы для 21 века: AAPG Memoir 97. 2012. С. 69–87.
8. Джарви Д. М. Системы сланцевых ресурсов нефти и газа: Ч. 2. Системы сланцевых ресурсов нефти. Сланцевые резервуары // Гигантские ресурсы для 21 века: AAPG Memoir 97. 2012. С. 89–119.
9. Петрофизическая оценка для повышения эффективности гидравлической стимуляции в горизонтальных скважинах сланцевого газа / Д. Буллер, С.Н. Хьюз, Дж. Маркет [и др.] // SPE-132990. 2010.

10. Техничко-технологические аспекты геомеханического воздействия на пласт / С. Н. Закиров, А. Н. Дроздов, Э. С. Закиров [и др.] // *Neftegaz.RU*. 2018. № 6. С. 24–29.
11. Природные проявления геомеханических процессов / С. Н. Закиров, А. Н. Дроздов, Б. Г. Алексеев, А. В. Колобанов // *Недропользование-XXI век*. 2018. № 3. С. 72–77.
12. Permeability alteration of carbonate reservoir rock under cyclic geomechanical treatment / I. M. Indrupskiy, I. I. Ibragimov, R. A. Zakiryaynov [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. V. 921. 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/921/1/012009>
13. Цифровой керн – текущее состояние и перспективы развития технологии в ПАО «НК «Роснефть» / А. Н. Лазеев, Э. О. Тимашев, И. А. Вахрушева [и др.] // *Нефтяное хозяйство*. 2018. № 11. С. 18–22. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-11-18-22>
14. Опыт изучения емкостных свойств и насыщенности коллекторов, содержащих сверхвязкие нефти, методом ЯМР / М. И. Загидуллин, А. Г. Потапов, Э. С. Абдрахманов [и др.] // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. 2020. № 10(346). С. 68–77. [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2020-10\(346\)-68-77](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2020-10(346)-68-77)
15. Опыт применения инновационного аппаратурно-методического комплекса АИНК-ПЛ в петрофизическом моделировании в периметре ПАО «НК «Роснефть» / И. Р. Махмутов, И. М. Ракаев, Д. А. Митрофанов [и др.] // *Нефтяное хозяйство*. 2023. № 2. С. 66–71. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-2-66-71>
16. Фильтрационно-емкостные свойства пород баженовской свиты / Р. А. Хамидуллин, Г. А. Калмыков, Д. В. Корост [и др.] // *Вестник Московского университета Серия 4. Геология*. 2013. № 5. С. 57–64. <http://doi.org/10.3103/S0145875213050050>
17. Огильви А. А. Основы инженерной геофизики. Москва: Недра, 1990. 502 с.
18. Козявин Д. Д., Денисенко Т. Г. Исследование возможностей метода пенно-проппантного кислотного гидроразрыва пласта // *Международный журнал гуманитарных и промышленных наук*. 2020. №12 (51). С. 59-62. <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2020-11605>
19. Колесова С. Б., Полозов М. Б. Использование кислотного ГРП для повышения нефтеотдачи низкопроницае-

- мых коллекторов каширо-подольских отложений // Экспозиция. Нефть. Газ. 2019. № 3. С. 54–56. <https://doi.org/10.24411/2076-6785-2019-10023>
20. Гильманов Я. И. Оценка емкостного пространства березовской свиты современными лабораторными методами // Вести Газовой Науки. 2021. № 1 (46). С. 170–175.

References

1. Dudayev SA, Dudayev RS. Khadumites of the Ciscaucasia: New Developments in Geological and Geophysical Studies, Secondary Discovery, and Development. Moscow: Geoinformmark Publishing House; 2015. 204 p. (In Russ.).
2. Kerimova EG, Shesteren AO, Mushegova AI, Khavanov PD. Research of the possibility of using simulation modeling for studying clay reservoirs. Innovative technologies in the oil and gas industry. Problems of sustainable development of territories. Collection of works of the II International scientific and practical conference. Stavropol. Publishing house "Bureau of news"; 2021. P. 55-59. (In Russ.).
3. Kerimova EG, Sokolenko EV, Saltanova AG, Kerimov AG. Interpretation of the results of X-ray diffraction analysis of rock samples using the example of oil fields in the Volgograd region. Modern problems of geology, geophysics and geoecology of the North Caucasus. Collection of materials of the IX All-Russian scientific and technical conference. Vol. IX. Moscow: IIET RAS; 2019. P. 252-258. (In Russ.).
4. Spectrum of pore types and networks in shale rocks and a descriptive classification of pores associated with the shale rock matrix. RG Loucks, RM Reed, SC Ruppel, U. Hammes. AAPG Bull. 2012;96(6):1071-1098. (In Russ.).
5. Perkins TK, Kern LR. Width of hydraulic fractures. Soc. Petrol. Engr. JPT, Sept. 1961, p. 937-949.
6. Strubhar MK. Multiple, Vertical Fractures From an Inclined Wellbore – A Field Experiment. Journ. Petr. Technol. 1975, May. p. 641-647.
7. Jarvie DM. Shale Oil and Gas Resource Systems: Part 1. Shale Gas Resource Systems. Shale Reservoirs. Giant Resources for the 21st Century: AAPG Memoir 97. 2012. P. 69-87. (In Russ.).
8. Jarvie DM. Shale Oil and Gas Resource Systems: Part 2. Shale Oil Resource Systems. Shale Reservoirs. Giant Re-

- sources for the 21st Century: AAPG Memoir 97. 2012. P. 89–119. (In Russ.).
9. Buller D, Hughes SN, Market J [et al.]. Petrophysical evaluation for improving the efficiency of hydraulic stimulation in horizontal shale gas wells. SPE-132990. 2010. (In Russ.).
 10. Zakirov SN, Drozdov AN, Zakirov ES [et al.]. Technical and technological aspects of geomechanical impact on the formation. *Neftegaz.RU*. 2018;(6):24-29. (In Russ.).
 11. Zakirov SN, Drozdov AN, Alekseev BG, Kolobanov AV. Natural manifestations of geomechanical processes. *Subsoil use XXI century*. 2018;(3):72-77. (In Russ.).
 12. Indrupskiy IM, Ibragimov II, Zakiryaynov RA [et al.]. Permeability alteration of carbonate reservoir rock under cyclic geomechanical treatment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;921: 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/921/1/012009> (In Russ.).
 13. Lazeev AN, Timashev EO, Vakhrusheva IA [et al.]. Digital core – current state and prospects for technology development at PJSC NK Rosneft. *Oil industry*. 2018;(11):18-22. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2018-11-18-22> (In Russ.).
 14. Zagidullin MI, Potapov AG, Abdrakhmanov ES [et al.]. Experience in studying the capacitive properties and saturation of reservoirs containing super-viscous oils using the NMR method. *Geology, geophysics and development of oil and gas fields*. 2020;10 (346):68-77. [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2020-10\(346\)-68-77](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2020-10(346)-68-77) (In Russ.).
 15. Makhmutov IR, Rakaev IM, Mitrofanov DA [et al.]. Experience of using the innovative hardware and methodological complex AINK-PL in petrophysical modeling within the perimeter of PJSC NK Rosneft. *Oil industry*. 2023;(2):66-71. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-2-66-71> (In Russ.).
 16. Khamidullin RA, Kalmykov GA, Korost DV [et al.]. Filtration and capacity properties of rocks of the Bazhenov Formation. *Bulletin of Moscow University Series 4. Geology*. 2013;(5):57-64. <http://doi.org/10.3103/S0145875213050050> (In Russ.).
 17. Ogilvie A A. *Fundamentals of Engineering Geophysics*. Moscow: Nedra; 1990. 502 p. (In Russ.).
 18. Kozyavin DD, Denisenko TG. Study of the Possibilities of the Foam-Proppant Acid Hydraulic Fracturing Method. *International Journal of Humanitarian and Industrial Sciences*. 2020;12(51):59-62. <https://doi.org/10.24411/2500-1000-2020-11605> (In Russ.).

19. Kolesova SB, Polozov MB. Use of acid hydraulic fracturing to enhance oil recovery from low-permeability reservoirs of the Kashira-Podolsk deposits. Exposure. Oil. Gas. 2019;(3):54-56. <https://doi.org/10.24411/2076-6785-2019-10023> (In Russ.).
20. Gil'manov Yal. Assessment of the capacitive space of the Berzovskaya suite using modern laboratory methods. News of Gas Science. 2021;1(46):170-175. (In Russ.).

Информация об авторах

Вячеслав Григорьевич Копченков – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации автомобилей, Северо-Кавказский федеральный университет, Scopus ID: 6603271703

Владимир Васильевич Федоренко – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной математики и математического моделирования, Северо-Кавказский федеральный университет. ResearcherID: D-5811-2013
Проведены исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

Раиса Егоровна Шестерикова – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии переработки нефти и промышленной экологии факультета нефтегазовой инженерии, Северо-Кавказский федеральный университет.

Владимир Сергеевич Крамаренко – аспирант кафедры нефтегазовой геофизики, Северо-Кавказский федеральный университет
Scopus ID: 57189620072

Елизавета Гапуровна Керимова – старший преподаватель нефтегазовой геофизики, Северо-Кавказский федеральный университет
Scopus ID: 57220025188

Вклад авторов

Все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Information about the authors

Vyacheslav G. Kopchenkov – Dr. Sci. (Engin.), Professor, Professor, the Department of Technical Operation of Automobiles, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 6603271703

Vladimir V. Fedorenko – Dr. Sci. (Techn.), Professor, Professor of the Department of Applied Mathematics and Mathematical Modeling, North-Caucasus Federal University. ResearcherID: D-5811-2013.

Raisa E. Shesterikova – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Oil Refining Technology and Industrial Ecology, Faculty of Petroleum Engineering, North-Caucasus Federal University.

Vladimir S. Kramarenko – Postgraduate Student, Department of Petroleum Geophysics, North-Caucasus Federal University. Scopus ID: 57189620072

Elizaveta G. Kerimova – Senior Lecturer, Petroleum Geophysics, North-Caucasus Federal University. Scopus ID: 57220025188

Contribution of the authors

All authors contributed equally to the preparation of this publication.



НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал
Северо-Кавказского федерального
университета

ISSN 2308–4758

Выпуск №4, 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 20.12.2025 г. Выход в свет 30.12.2025 г.
Формат 70 × 108 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага
офсетная. Усл. печ. л. 18,03. Тираж 1000 экз. Цена 534 руб.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет».
355029, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2.