

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 № 2, 2026 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: 10.07.2026.
Сведения о переименовании:	журнал «Наука. Инновации. Технологии» образован в 2012 году в результате перерегистрации журнала «Вестник Ставропольского государственного университета» в связи с переименованием учредителя.
Тираж	1000 экз.
Индекс	94011 «Объединённый каталог. ПРЕССА РОССИИ. Газеты и журналы». Включен в БД «Российский индекс научного цитирования», перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.
Учредитель	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».
Адрес редакции и издателя:	355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1. Телефон: (8652) 33-07-32; E-mail: nit_ncfu@mail.ru ; сайт: https://scienceit.elpub.ru/jour
Адрес издательства	Научной библиотеки ФГАОУ ВО «СКФУ»: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1.
Адрес типографии:	типография ФГАОУ ВО «СКФУ», 355029, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2.
	Материалы журнала открытого доступа в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License, которая разрешает их использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии правильного цитирования оригинальной работы.
Авторское право	на оригинал-макет и оформление принадлежит журналу, авторское право на статьи – авторам.

	«Наука. Инновации. Технологии» (Nauka. Innovatsii. Tekhnologii) Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета
Главный редактор:	Белозеров В. С., д-р геогр. наук, профессор (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия)
Заместитель главного редактора:	Щитова Н. А., д-р геогр. наук, профессор (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия)
Редакционный совет:	Абшаев М. Т., д-р физ.-мат. наук, профессор (Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия); Воробьева О. Д., д-р экон. наук, профессор (Московский государственный университет, г. Москва, Россия); Гасумов В. А., д-р техн. наук, профессор (Азербайджанский технический университет, г. Баку, Россия); Герасименко Т. И., д-р геогр. наук, профессор, стар. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва, Россия); Диневич Л. А., д-р физ.-мат. наук, профессор (Тель-Авивский университет, г. Тель-Авив, Израиль); Жакин А. И., д-р физ.-мат. наук, профессор (Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия); Зырянов А. И., д-р геогр. наук, профессор (Пермский государственный университет, г. Пермь, Россия); Ибрагимов А. И., д-р геогр. наук, профессор (Эгейский университет, Турция, г. Измир, Турция); Коляда А. А., д-р физ.-мат. наук, доцент (Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь); Лиховид А. А., д-р геогр. наук, профессор (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия); Молodikova 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); Гунькина Т. А., канд. техн. наук, доцент (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., доцент (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Тимченко Л. Д., д-р ветеринар. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Толпаев В. А., д-р физ.-мат. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); Федорова Н. Г., д-р техн. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь, Россия); 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, доцент (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия)
Переводчик-редактор:	Марченко Т. В., доктор филологических наук, доцент (Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Россия)
	© ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», оригинал-макет, оформление, 2026

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. 2, 2026

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: 10.07.2026
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://scienceit.elpub.ru/jour .
The address	of the publishing house of NCFU Scientific Library: 1, Pushkin Street, Stavropol, 355017.
The address	of the printing house: NCFU Publishing Complex, 2, Kulakova Ave., Stavropol, 355029.
The materials	of the journal are open access in accordance with the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 License, which permits their use, distribution and reproduction in any medium, provided that the original work is properly cited. The copyright for the original layout and design belongs to the journal; the copyright for the articles belongs to the authors.
	© FSAEI HI “North-Caucasus Federal University”, original layout, design, 2026

	“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); Tatiana A. Gunkina, PhD of Sci. (Tech.), Associate Professor (NCFU, Stavropol, Russian); 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.), Associate Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Lyudmila D. Timchenko, Dr. Sci. (Veterin.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Vladimir A. Tolpaev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor (NCFU, Stavropol, Russia); Natalia Fedorova, Dr. Sci. (Tech.), Professor (NCFU, Stavropol, Russia); 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.), Associate Professor Ivan A. Soloviev (North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia)
Translator-editor	Dr. Sci. (Philol.), Professor, Associate Professor Tatiana V. Marchenko (North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 2, 2026

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

1.6.12.	ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ (географические науки)	
	Т. В. Дегтярева Формирование микроэлемент- ного состава почв лесостепных ландшафтов Ставропольской возвышенности	11
	T. V. Degtyareva Formation of microelement compo- sition of soils of forest-steppe landscapes of the Stavropol upland	12
	А. В. Лысенко, Н. В. Сопнев, Ю. С. Власов Спутниковый мониторинг транс- формации приледниковых ландшафтов лед- ника Большой Азау в Приэльбрусье за период 2015–2025 гг.	29
	A. V. Lysenko, N. V. Sopnev, Y. S. Vlasov Satellite monitoring of changes in the state and boundaries of the Bolshoy Azau glacier and transformation of periglacial landscapes in Prielbrusye over 2015–2025.	30

1.6.13.	ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ (географические науки)	
	А. А. Черкасов, В. В. Чихичин	
	Этническая дифференциация урбанизационных процессов в постсоветской России	53
	A. A. Cherkasov, V. V. Chikhichin	
	Ethnic Differentiation of Urbaniza- tion Processes in Post-Soviet Russia.	54
1.6.18.	НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ (физико-математические науки)	
	Б. А. Ашабоков, И. С. Афанасьев, З. С. Гаева, В. А. Шаповалов	
	Состояние и основные направле- ния исследований физики облаков и активных воздействий	71
	B. A. Ashabokov, I. S. Afanasyev, Z. S. Gaeva, V. A. Shapovalov	
	Current state and main research trends in cloud physics and active effects	72
	С. О. Геккиева, А. Х. Будаев	
	Лабораторные исследования конденсационных свойств кластеров оксида - цинка	91

	S. O. Gekkieva,	
	A. Kh. Budaev	
	Laboratory studies of condensation	
	properties of zinc oxide clusters	92

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

2.8.4	РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (технические науки)	
	Р. К. Добролюбова,	
	Е. И. Инякина,	
	И. И. Краснов	
	Особенности свойств пластовых	
	углеводородных систем при разработке газо-	
	конденсатных залежей	113
	R. K. Dobrolyubova,	
	E. I. Inyakina,	
	I. I. Krasnov	
	Some features of the properties of	
	reservoir hydrocarbon systems in the development	
	of gas-condensate deposits.	114
	А.-Г. Г. Керимов,	
	Э. Р. Гасумов,	
	А. А. Пашаян,	
	Е. Г. Керимова,	
	Н. Г. Федорова	
	Моделирование технологичес-	
	ких процессов в программном комплексе tNa-	
	vigator	149

A.-G. G. Kerimov,

E. R. Gasumov,

A. A. Pashayan,

E. G. Kerimova,

N. G. Fedorova

Modeling of technological processes in the tNavigator software package 150

А. В. Спешилов

Повышение энергоэффективности процессов термохимической подготовки нефти путем оптимизации потоков теплоносителей 177

A. V. Speshilov

Energy efficiency improvement in thermochemical oil treatment processes through optimization of heat exchange media flows 178

1. **ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ**
1.6.12. Физическая география и биогеография,
география почв и геохимия ландшафтов
(географические науки)



Научная статья
УДК 550.424.4; 631.416.9
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.1>

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОЧВ ЛЕСОСТЕПНЫХ ЛАНДШАФТОВ СТАВРОПОЛЬСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

Татьяна Васильевна Дегтярева

Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина,
Ставрополь, 355017, Российская Федерация)
dtb.70@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8205-4268>

Аннотация.

Лесостепные ландшафты Ставропольской возвышенности являются важным объектом исследования микроэлементного состава почв в силу значительной представленности в структуре землепользования сельскохозяйственных угодий с плодородными почвами. Методами исследования стали: сравнительно-географический, ландшафтно-геохимический с заложением мезокатен в пределах основных элементарных ландшафтов с охватом почвенно-геохимических сопряжений, свойственных лесостепным ландшафтам Ставропольской возвышенности. Установлено, что почвам лесостепных ландшафтов Ставропольской возвышенности присущи специфические особенности радиальной и латеральной почвенно-геохимических структур миграции микроэлементов. В радиальной дифференциации валовых содержаний и псевдоваловых форм Cu, Zn и Cd, обменных форм Cd в профиле темно-серых лесных почв и черноземов типичных преобладает поверхностно-аккумулятивное распределение. Элювиально-иллювиальное распределение встречается у валовых содержаний и обменных форм Pb. Латеральная дифференциация валовых содержаний и псевдоваловых форм Cu, Zn, Pb и Cd в пределах заложённых ландшафтно-геохимических мезокатен не контрастна, что связано со значительной ёмкостью биогеохимических барьеров. Для обменных форм Cu, Zn и Cd установлен аккумулятивный вид латеральной дифференциации. На основании характеристик основных почвообразовательных процессов, свойств почвенных масс, особенностей радиальной и латеральной почвенно-геохимических структур, состава ведущих фаз-носителей микроэлементов в почвах

выделен лесостепной тип формирования микроэлементного состава почв. Результаты факторного анализа методом главных компонент (РСА) показали, что в лесостепном типе формирования микроэлементного состава почв предикторами, объясняющими 32,8 % общей дисперсии, выступают Сорг и pH. Вероятно, что формирование биогеохимического и щелочного геохимических барьеров значительно влияет на распределение микроэлементов в почвах лесостепных ландшафтов Ставропольской возвышенности.

Ключевые слова: лесостепные ландшафты, Ставропольская возвышенность, микроэлементы, темно-серые лесные почвы, черноземы.

Для цитирования: Дегтярева Т. В. Формирование микроэлементного состава почв лесостепных ландшафтов Ставропольской возвышенности // Наука. Инновации. Технологии. 2026. № 2. С. 11–28. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.1>

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 10.01.2026;
одобрена после рецензирования 12.04.2026;
принята к публикации 11.05.2026.

1.6.12.

**Physical geography and biogeography, soil geography
and landscape geochemistry (geographical sciences)**
Research article

Formation of microelement composition of soils of forest-steppe landscapes of the Stavropol upland

Tatyana V. Degtyareva

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

dtb.70@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8205-4268>

* Corresponding author

Abstract.

The forest-steppe landscapes of the Stavropol Upland are an important object of study for the microelement composition of soils due to the significant presence of agricultural lands with fertile soils in the land use structure. The study methods were comparative geography and landscape geochemistry, identifying mesocatenas within the main elementary landscapes and en-

compassing the soil-geochemical interfaces characteristic of the forest-steppe landscapes of the Stavropol Upland. It was established that the soils of the forest-steppe landscapes of the Stavropol Upland exhibit specific features of the radial and lateral soil-geochemical patterns of microelement migration. In the radial differentiation of the total contents and pseudototal forms of Cu, Zn, and Cd, and the exchangeable forms of Cd in the profiles of dark gray forest soils and typical chernozems, a surface-accumulative distribution predominates. Eluvial-illuvial distribution is observed for the total contents and exchangeable forms of Pb. Lateral differentiation of the total contents and pseudototal forms of Cu, Zn, Pb, and Cd within the established landscape-geochemical mesocatenas is non-contrasting, which is associated with the significant capacity of biogeochemical barriers. An accumulative type of lateral differentiation was established for the exchangeable forms of Cu, Zn, and Cd. Based on the characteristics of the main soil-forming processes, the properties of soil masses, the features of the radial and lateral soil-geochemical structures, and the composition of the leading phases-carriers of microelements in soils, a forest-steppe type of formation of the microelement composition of soils was identified. The results of factor analysis using the principal component analysis (PCA) showed that Corg and pH act as predictors in the forest-steppe type of formation of the microelement composition of soils, explaining 32.8% of the total variance. It is likely that the formation of biogeochemical and alkaline geochemical barriers significantly affects the distribution of microelements in the soils of the forest-steppe landscapes of the Stavropol Upland.

Keywords: forest-steppe landscapes, Stavropol Upland, microelements, dark gray forest soils, chernozems.

For citation: Degtyareva TV. Formation of microelement composition of soils of forest-steppe landscapes of the Stavropol upland. Science. Innovations. Technologies. 2026;(2):11-28. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.1>

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

The article was submitted 10.01.2026;
approved after reviewing 12.04.2026;
accepted for publication 11.05.2026.

Введение

Лесостепные ландшафты Ставропольской возвышенности относятся к почвенно-климатическим зонам неустойчивого, достаточного и засушливого увлажнения с развитием нескольких типов и подтипов почв: темно-серых лесных, черноземов выщелоченных, типичных и обыкновенных, лугово-черноземных, луговых и др. [1, 2]. Степень сельскохозяйственного освоения черноземных почв достигает 77 % [3], что ставит вопрос сохранения их плодородия, в том числе и обеспеченности микроэлементами, в разряд актуальных. Помимо обеспеченности микроэлементами, важным является установление особенностей их радиальной и латеральной дифференциации, основных почвообразовательных процессов, свойств почвенных масс, преобладающих фаз-носителей микроэлементов. Эти составляющие параметры характеристики микроэлементного состава почв позволяют дать комплексное описание картины образования и перераспределения в почвах соединений микроэлементов.

Цель исследования – установление особенностей формирования микроэлементного состава почв лесостепных ландшафтов Ставропольской возвышенности. Многоаспектный характер развития в почвах системы соединений микроэлементов обуславливает рассмотрение разных сторон данного процесса.

Материалы и методы исследований

В основу исследования легли результаты почвенно-геохимического опробования на территории двух ландшафтов лесостепной провинции Ставропольской возвышенности – Верхнегорлыкского и Ташлянского. В их пределах были заложены ландшафтно-геохимические мезокатены, включившие в себя автономные (А), трансэлювиальные (ТЭ) и трансэлювиально-аккумулятивные (ТЭА) элементарные ландшафты. Согласно типизации катен Европейской территории России по ландшафтным и почвенно-геохимическим условиям миграции вещества [4], наиболее представительными для лесостепных ландшафтов являются катены: Л^т – Л_г, Ч^в(Ч^т) – Ч_л. Именно для этих почвенно-геохимических сопряжений были проведены исследования микроэлементного состава почв с заложением почвенных разрезов и отбором образцов.

В лабораторных условиях определялись: pH водной вытяжки потенциометрическим методом, содержание органического углерода $C_{\text{орг}}$ титриметрическим методом (по И. В. Тюрину), гранулометрический состав методом лазерной дифрактометрии с выделением фракции физической глины (PM_{10}). Микроэлементный состав почв анализировался с определением валовых содержаний Cu, Zn, Pb и Cd на рентгенфлуоресцентном спектрометре «Xenometrix EX-Calibur»; их псевдоваловых форм методом кислотной экстракции [5] и обменных форм с использованием ацетатно-аммонийного буферного раствора [6]. Для анализа данных рассчитывались коэффициенты радиальной (R) и латеральной (L) дифференциации, использовались методы описательной статистики, корреляционного и факторного анализов.

Результаты исследований и их обсуждение

Лесостепные ландшафты Ставропольской возвышенности представляют собой участки с абсолютными высотами от 450 до 800 м н.у.м. [7]. Их развитие связано с Транскавказским поперечным субмеридиональным поднятием, формирование которого происходило в среднем плиоцене и в дальнейшем определило лесостепной облик физико-географических комплексов юго-запада Ставропольской возвышенности [3]. Рельеф территории имеет значительную степень расчлененности: высокие платообразные поверхности разделены глубокими долинами с террасовыми уступами и оползневыми формами на крутых склонах. Такие геоморфологические особенности способствуют усиленному развитию поверхностной и глубинной водной эрозии.

Климат лесостепных ландшафтов Ставропольской возвышенности – умеренный континентальный. Соотношение количества осадков с испаряемостью составляет около 1 [3]. Формируется периодически промывной тип водного режима, в условиях которого в почвах сочетаются биогенно-аккумулятивные и элювиально-иллювиальные процессы [8].

Растительность лесостепных ландшафтов отличается разнообразием. Имеющиеся участки центрально-ставропольских широколиственных лесов представлены большей частью дубо-

во-грабово-ясеновыми и буково-дубово-грабовыми лесами; встречаются также массивы буковых лесов [9]. Для лесов характерным является произрастание на возвышенных местоположениях и склонах. Помимо этого, леса встречаются вблизи речных пойм, занимая территории с хорошим грунтовым увлажнением.

В местах выхода плотных карбонатных отложений (сарматских известняков) к поверхности платообразных плакоров происходит смена лесной растительности на луговую степь [9]. Помимо луговой степи, широко распространена разнотравно-дерновинно-злаковая степь, которую формируют целинные злаки, такие как: келерия стройная *Koeleria cristata*, ковыль красивейший *Stipa pulcherrima*, костер береговой *Bromopsis riparia*, овсяница валлиская *Festuca valesiaca*.

Почвообразующими породами в лесостепных ландшафтах Ставропольской возвышенности являются элювиально-делювиальные песчано-известняковые и глинистые отложения сармата, лессовидные суглинки, элювий плотных пород (известняка, песчаника) и майкопских глин, аллювиальные отложения [1]. Согласно классификации почвообразующих комплексов пород Северного Кавказа В. В. Дьяченко [10], большинство этих отложений относятся к терригенным и терригенно-карбонатным почвообразующим комплексам неогена.

Почвенный покров лесостепных ландшафтов Ставропольской возвышенности представлен темно-серыми лесными почвами, черноземами выщелоченными, типичными и обыкновенными, лугово-черноземными и луговыми почвами [1, 2]. Их пространственные сочетания характеризуются распространением темно-серых лесных почв на плакорных водораздельных поверхностях и склонах с хорошим грунтовым увлажнением. Черноземы занимают водоразделы, большую часть склоновых и пониженных территорий речных долин и балок. В понижениях и пойменных участках распространены лугово-черноземные и луговые почвы.

В ходе проведенных почвенно-геохимических исследований изучены катены: Л_т – Л_г с темно-серыми лесными почвами на автомных местоположениях и серых лесных грунтово-глеевых почв в транэлювиально-аккумулятивных условиях миграции (ключевой

участок «Верхнегорлыкский» в одноименном лесостепной ландшафте); Ч^г – Чл с черноземами типичными на автономных местоположениях и лугово-черноземными почвами в подчиненных позициях ландшафтно-геохимической мезокатены ключевого участка «Ташлянский» в Ташлянском лесостепном ландшафте. Почвообразующими породами на изученных ключевых участках являются элювиально-делювиальные отложения среднего сармата, представленные продуктами разрушения известняков, песчаников, глин.

Рассматривая особенности микроэлементного состава почв лесостепных ландшафтов Ставропольской возвышенности, возможно говорить о «лесостепном» типе формирования микроэлементного состава почв. При этом под *типом формирования микроэлементного состава почв* понимается совокупность характеристик, определяющих как условия формирования системы почвенных соединений микроэлементов (почвенные процессы, свойства почвенных масс), так и особенности нахождения соединений микроэлементов в почвах (радиальная и латеральная почвенно-геохимические структуры распределения микроэлементов, их связь с ведущими фазами-носителями). Выделяемому лесостепному типу формирования микроэлементного состава почв присущи следующие характеристики:

1. *Основные почвообразовательные процессы* – гумусообразование и гумусонакопление, лессиваж, оглинение, иллювиирование, окарбоначивание. На наличие этих процессов в почвах лесостепных ландшафтов указывается в работах Б. П. Ахтырцева [11], И. Г. Побединцевой и Т. М. Диановой [12], В. Ф. Валькова и др. [2], Н. А. Протасовой [8], Н. А. Протасовой и А. В. Беяева [13].

2. *Основные свойства почвенных масс* отличаются дифференциацией в зависимости от типов почв. Темно-серым лесным почвам свойственны слабокислые условия в верхней части почвенного профиля, переходящие в нейтральные или слабощелочные в нижней части почвенного профиля. Так, на участке «Верхнегорлыкский» с дубово-грабово-ясеневыми лесами водораздельные темно-серые лесные почвы характери-

зуются слабокислой реакцией среды в гумусовом горизонте (среднее значение pH 6,2), которая в нижней части почвенного профиля становится слабощелочной (среднее значение pH 7,3). Такая контрастная смена щелочно-кислотных условий в пределах почвенного профиля способствует формированию щелочного геохимического барьера [14]. На участке «Ташлянский» с разнотравно-дерновиннозлаковой степью у черноземов типичных остаточно-карбонатных автономных ландшафтов в гумусовом горизонте складываются нейтральные щелочно-кислотные условия (среднее значение pH 7,0); в нижней части почвенного профиля значения pH увеличиваются до слабощелочной градации (7,5–7,9).

3. *Особенности радиальной почвенно-геохимической структуры* имеют различный характер в зависимости от почвообразующих пород, положения в ландшафтном сопряжении. В почвах мезокатены «Верхнегорлыкский» установлено преобладание поверхностно-аккумулятивного распределения валовых содержаний и псевдоваловых форм Cu, Zn и частично Cd, обменных форм Cd (табл. 1). Для валовых содержаний и обменных форм Pb характерно элювиально-иллювиальное распределение; для его псевдоваловых форм – равномерное. Корреляционный анализ ($n = 42$) выявил значимые положительные корреляции валовых содержаний и псевдоваловых форм Zn и Cu, обменных форм Cd с $C_{орг}$; псевдоваловых и обменных форм Pb, обменных форм Cd с pH; валовых содержаний Pb с фракцией PM_{10} (табл. 2). Это косвенно свидетельствует о наличии биогеохимического барьера с концентрацией Zn и Cu, щелочного и сорбционного геохимических барьеров с накоплением Pb.

На участке «Ташлянский» в черноземах типичных и лугово-черноземных почвах радиальная дифференциация валовых содержаний и псевдоваловых форм Zn и Cu, обменных форм Cu и Pb соответствует поверхностно-аккумулятивному распределению. Валовые содержания Pb и Cd, их псевдоваловые формы, обменные формы Cd характеризуются аккумулятивным элювиально-иллювиальным распределением. Элювиально-иллювиальное распределение встречается у обменных форм Cd и Pb, валовых содержаний и псевдоваловых форм Pb. Установлены значимые корреляции валовых

Таблица 1. РАДИАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ
В ПРОФИЛЕ ПОЧВ ЛЕСОСТЕПНЫХ КЛЮЧЕВЫХ УЧАСТКОВ
СТАВРОПОЛЬСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ
Table 1. Radial distribution of microelements in the soil profile
of forest-steppe key areas of the Stavropol Upland

Участок	Ланд-шафты	Преобладающее распределение (нижний индекс – значение R)			
		Поверхностно-аккумулятивное	Аккумулятивное элювиально-иллювиальное	Равномерное	Элюви-ально-иллювиальное
1	А	Cu_{1,4} Zn_{1,3} Zn_{1,3} Cu_{1,2} Cd_{1,2} Cd_{1,4}	Cu_{1,3} Zn_{1,2}	Cd_{1,1} Pb_{0,9}	Pb_{0,8} Pb_{0,7}
2		Zn_{1,7} Cu_{1,4} Zn_{1,8} Cu_{1,5} Cu_{3,3}	Pb_{1,2}	Cd_{0,9} Pb_{1,1} Cd_{1,0} Zn_{0,9}	Cd_{0,5} Pb_{0,4}
1	ТЭ	Cu_{1,3} Zn_{1,3} Zn_{1,5} Cu_{1,4} Cd_{1,9}	—	Cd_{1,1} Cd_{0,9} Zn_{1,1} Cu_{1,0}	Pb_{0,8} Pb_{0,7} Pb_{0,7}
2		Zn_{1,4} Cu_{1,4} Cu_{1,4} Zn_{1,2} Cu_{2,5}	Pb_{1,5} Cd_{1,5} Cd_{1,6} Pb_{1,4}	Zn_{0,9}	Pb_{0,6} Cd_{0,3}
1	ТЭА	Cd_{1,3} Cu_{1,2} Zn_{1,2} Zn_{1,4} Cu_{1,4} Cd_{1,2} Cd_{1,6}	Pb_{0,9}	Zn_{1,1} Cu_{1,1}	Pb_{0,5} Pb_{0,6}
2		Zn_{1,5} Cu_{1,3} Zn_{1,5} Cu_{1,3} Cu_{2,4} Pb_{1,5}	Cd_{1,7}	Cd_{0,9} Cd_{0,9} Zn_{1,1}	Pb_{0,7} Pb_{0,7}

Примечание: ключевые участки: 1 – «Верхнегорлыкский», 2 – «Ташлянский»;
синий шрифт – валовые содержания, зеленый шрифт – псевдоваловые
формы, красный шрифт – обменные формы микроэлементов.
Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Таблица 2. КОРРЕЛЯЦИОННАЯ МАТРИЦА МЕЖДУ СВОЙСТВАМИ ПОЧВ
УЧАСТКА «ВЕРХНЕГОРЛЫКСКИЙ» И СОДЕРЖАНИЕМ
МИКРОЭЛЕМЕНТОВ
Table 2. Correlation matrix between the soil properties
of the Verkhnegorlytsky site and the content of microelements

Микро-элементы	рН			C _{орг}			Фракция РМ ₁₀		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Pb	0,19	<u>0,57</u>	<u>0,68</u>	-0,15	<u>-0,63</u>	<u>-0,64</u>	<u>0,34</u>	0,27	0,15
Cd	-0,21	-0,14	<u>-0,49</u>	0,28	0,23	<u>0,42</u>	-0,16	-0,11	-0,23
Zn	-0,82	<u>-0,79</u>	-0,07	<u>0,84</u>	<u>0,64</u>	0,22	-0,21	-0,22	-0,11
Cu	<u>-0,70</u>	<u>-0,78</u>	0,01	<u>0,82</u>	<u>0,85</u>	-0,13	-0,26	-0,22	-0,11

Примечание: 1 – валовые содержания, 2 – псевдоваловые формы, 3 – обменные формы
микроэлементов; жирным шрифтом с нижним подчеркиванием – значимые
корреляции при p < 0,05.
Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

вых содержаний и псевдоваловых форм Zn и Cu, обменных форм Cu с рН и $C_{орг}$, обменных форм Pb с рН; с фракцией PM_{10} коррелирует валовое содержание Cu (табл. 3).

Таблица 3. КОРРЕЛЯЦИОННАЯ МАТРИЦА МЕЖДУ СВОЙСТВАМИ ПОЧВ УЧАСТКА «ТАШЛЯНСКИЙ» И СОДЕРЖАНИЕМ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ
Table 3. Correlation matrix between the soil properties of the Tashlyansky site and the content of microelements

Микро-элементы	рН			$C_{орг}$			Фракция PM_{10}		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Pb	-0,06	-0,08	<u>0,38</u>	0,12	-0,05	0,04	0,13	0,02	0,17
Cd	-0,11	0,04	-0,09	0,13	0,25	-0,03	0,15	0,31	-0,13
Zn	<u>-0,57</u>	<u>-0,54</u>	0,04	<u>0,59</u>	<u>0,60</u>	0,08	0,19	0,16	0,11
Cu	<u>-0,39</u>	<u>-0,34</u>	<u>-0,35</u>	<u>0,56</u>	<u>0,48</u>	<u>0,83</u>	<u>0,37</u>	0,32	0,33

Примечание: 1 – валовые содержания, 2 – псевдоваловые формы, 3 – обменные формы микроэлементов; жирным шрифтом с нижним подчеркиванием – значимые корреляции при $p < 0,05$.

Источник: составлено автором.

Source: compiled by the author.

4. Особенности латеральной почвенно-геохимической структуры проявляются в неконтрастном характере перераспределения микроэлементов по ландшафтно-геохимической мезокатене участка «Верхнеегорлыкский» с темно-серыми лесными и серыми лесными грунтово-глеевыми почвами (преобладают значения $L = 0,8-1,3$) (рис. 1). Это говорит, вероятно, о значительной емкости биогеохимических круговоротов химических элементов, что отмечается в работах многих авторов [15, 16].

Латеральная дифференциация валовых содержаний и псевдоваловых форм микроэлементов в черноземах типичных и лугово-черноземных почвах участка «Ташлянский» также неконтрастна. Обменные формы микроэлементов имеют аккумулятивный вид латеральной дифференциации как в почвах трансэлювиальных ландшафтов склонов (для Cu, Zn, Cd $L = 1,4-1,5$), так и в почвах трансэлювиально-аккумулятивных ландшафтов ($L = 1,8-3,2$).

5. *Основные фазы-носители микроэлементов*

в почвах лесостепных ландшафтов исследовались в многочисленных публикациях. Установлено, что в серых лесных почвах Zn на 70% включен в состав силикатных минералов; на 17% – в гидроксидах Fe и Mn; на 10% – в составе фракции с органическим веществом. Pb максимально (48,5 %) находится на гидроксидах Fe и Mn, с силикатными минералами в остаточной фракции – 36–37%, с органическим веществом – 7,2% [15]. Данные по фракционному распределению Cu в темно-серых лесных почвах приводят П. Г. Адерихин и М. Т. Копаева (1981): «до 48% Cu связано с минеральной частью темно-серых лесных почв, 17% – с гуминовыми кислотами и 37% – с фульвокислотами» (цит. по: [13, с. 158]).

Таким образом, в качестве фаз-носителей микроэлементов в лесостепных почвах выступают силикатные минералы, оксиды (гидроксиды) Fe и Mn, органическое вещество и органоминеральные комплексы, карбонаты. Действие процессов иллювиирования приводит к перераспределению фаз-носителей микроэлементов в составе илистых фракций по почвенному профилю.

Проведение факторного анализа методом главных компонент (РСА) показало, что в лесостепном типе формирования микроэлементного состава почв за 87,8% общей дисперсии данных отвечают 4 фактора (рис. 2).

Первый фактор (PC1) характеризует влияние C_{org} и pH на микроэлементный состав почв, объясняющее 32,8% общей дисперсии. В данном случае, вероятно, формирование биогеохимического и щелочного геохимических барьеров значительно определяет распределение микроэлементов в почвах лесостепных ландшафтов Ставропольской возвышенности.

Вторым фактором (PC2), включающим в себя валовые содержания Pb, Zn и Cu, объясняется 27,2% от общей дисперсии. По своей факторной нагрузке второй фактор приближается к первому фактору, определяя роль трех микроэлементов, совместно накапливающихся как на биогеохимических, так и на щелочных барьерах. Третьим фактором (PC3), дающим 16,5% общей дисперсии, является фракция PM_{10} . В почвах Ставропольской возвышенности содержание фракции PM_{10} является важным свойством, с которым

Верхнегорлыкский

L	A	ТЭ	ТЭА	A	ТЭ	ТЭ	A	ТЭ	ТЭА
Pb	1	0.9	1.1	1	0.8	0.6	1	1	1.1
Cd	1	1	1.4	1	0.8	1.1	1	1.2	1.3
Zn	1	0.9	1	1	0.9	0.9	1	0.9	1.1
Cu	1	0.9	1	1	0.9	1.1	1	1.1	1.3

Ташлянский

L	A	ТЭ	ТЭА	A	ТЭ	ТЭ	A	ТЭ	ТЭА
Pb	1	1.1	0.9	1	1.1	0.9	1	0.9	3.2
Cd	1	1	0.9	1	1	1.1	1	1.4	2.1
Zn	1	1.1	1.2	1	0.9	1.1	1	1.4	1.8
Cu	1	1	1.1	1	1	1	1	1.5	2.2

- валовое содержание
- псевдоваловые формы
- обменные формы

Рис. 1. Коэффициенты латеральной дифференциации микроэлементов в почвах элементарных ландшафтов лесостепных ключевых участков

Fig. 1. Coefficients of lateral differentiation of microelements in soils of elementary landscapes of forest-steppe key areas

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

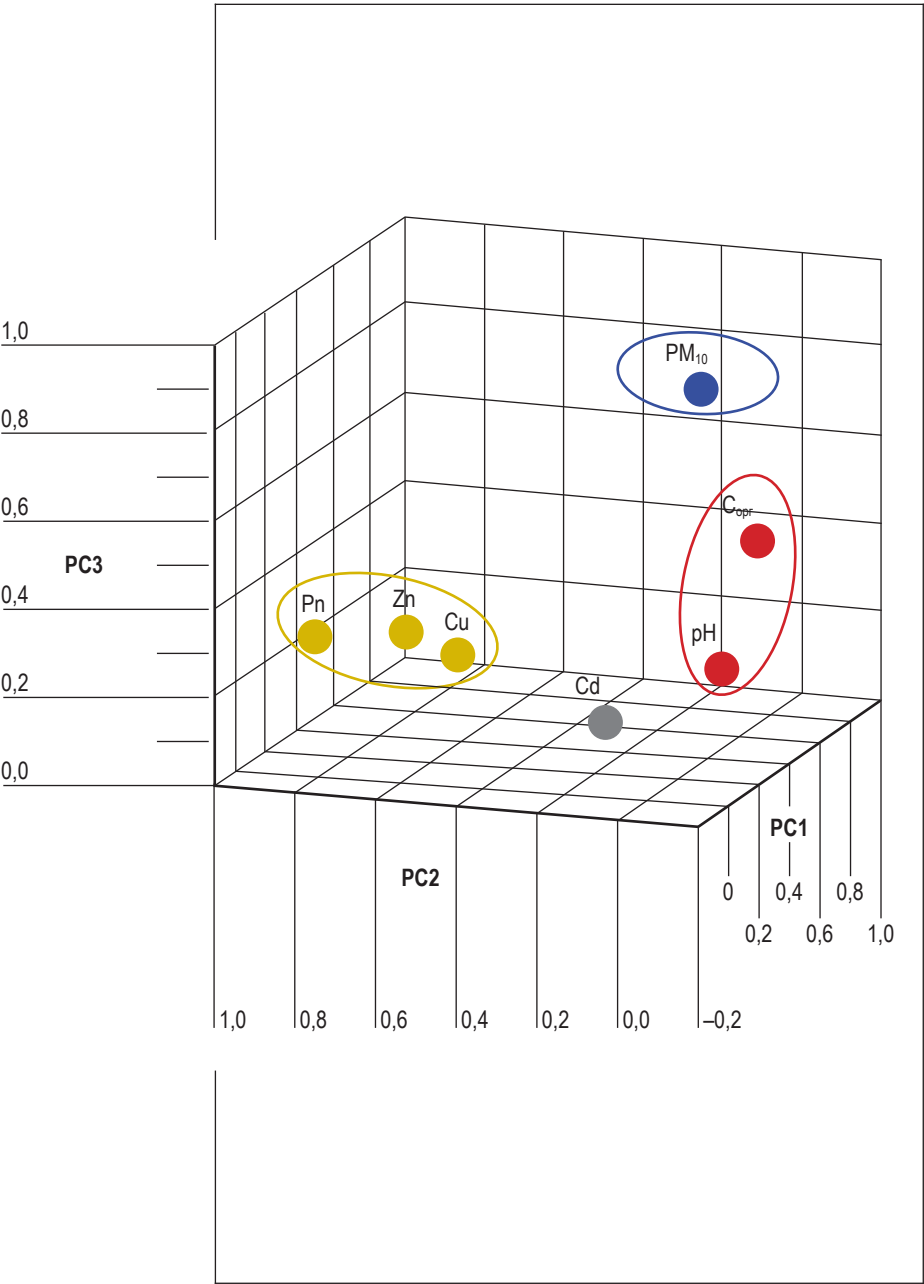


Рис. 2. Результаты метода PCA, отражающие главные компоненты лесостепного типа формирования микроэлементного состава почв (PC1-PC3 – факторные нагрузки)

Fig. 2. Results of the PCA method, reflecting the main components of the forest-steppe type of formation of the microelement composition of soils (PC1-PC3 – factor loads)

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

связано распределение Pb (для почв участка «Верхнеегорлыкский» установлены значимые корреляции с распределением фракции PM_{10} : $r = 0,34$) и Cu (для почв участка «Ташлянский» корреляции с распределением фракции PM_{10} при $r = 0,37$). Процессы иллювиирования, свойственные почвам лесостепных ландшафтов Ставропольской возвышенности в условиях периодически промывного типа водного режима, вероятно, определяют важное значение фракции PM_{10} в перераспределении микроэлементов по почвенному профилю. Четвертым фактором (PC4), объясняющим 11,3 % общей дисперсии, является распределение валового содержания Cd. Данный микроэлемент имеет значение в силу своей высокой миграционной подвижности в условиях слабокислой среды, характерной для некоторых почв (верхняя часть почвенного профиля) лесостепных ландшафтов Ставропольской возвышенности.

Заключение

В ходе исследования микроэлементного состава почв лесостепных ландшафтов Ставропольской возвышенности установлены особенности протекания основных почвообразовательных процессов, свойств почвенных масс, радиальной и латеральной почвенно-геохимической структур, состава ведущих фаз-носителей микроэлементов. Примененные методы полевых почвенно-геохимических исследований, камеральной обработки материалов, анализа научной информации по аналогичным почвам Европейской территории России дали возможность выделить лесостепной тип формирования микроэлементного состава почв. Его основными предикторами, определяющими образование в почвах системы соединений микроэлементов, являются $C_{орг}$ и pH. Существенное значение для лесостепного типа формирования микроэлементного состава почв играет наличие биогеохимического и щелочного геохимических барьеров, обуславливающих в почвах зоны концентрации микроэлементов. В целом, лесостепной тип формирования микроэлементного состава почв представляет собой один из вариантов образования системы почвенных соединений микроэлементов в ландшафтах Северного Кавказа.

Список источников

1. Система земледелия нового поколения Ставропольского края / Кулинцев В. В., Годунова Е. И., Желнакова Л. И. и др. Ставрополь: Агрус, 2013. 520 с.
2. Вальков В. Ф., Штомпель Ю. А., Тюльпанов В. И. Почвоведение (почвы Северного Кавказа). Краснодар: Сов. Кубань, 2002. 728 с.
3. Шальнев В. А. Эволюция ландшафтов Северного Кавказа. Ставрополь. Изд-во СГУ, 2007. 310 с.
4. Богданова М. Д. Методология мелкомасштабного почвенно-геохимического картографирования: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.23 / Богданова Мария Данииловна. Москва, 2004. 156 с.
5. Руководящий документ. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом в лабораториях Общегосударственной службы наблюдения и контроля загрязнения природной среды. РД 52.18.19189. М., 1990. 32 с.
6. Руководящий документ. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом в лабораториях Общегосударственной службы наблюдения и контроля загрязнения природной среды. РД 52.18.28990. М., 1991. 35 с.
7. Климатология туманов в Центральном Предкавказье / Ю. Л. Смерек, В. И. Волкова, М. В. Барекова, Г. Х. Бадахова // Наука. Инновации. Технологии. 2023. № 2. С. 143-176.
8. Протасова Н. А. Микроэлементы в черноземах и серых лесных почвах Центрального Черноземья: автореф. дис. ... д-ра биол. наук: 03.00.27 / Протасова Нина Алексеевна. Воронеж, 2002. 40 с.
9. Дзыбов Д. С. Растительность Ставропольского края. Ставрополь: Агрус, 2018. 492 с.
10. Дьяченко В. В. Геохимия, систематика и оценка состояния ландшафтов Северного Кавказа. Ростов-на-Дону: Комплекс, 2004. 268 с.
11. Ахтырцев Б. П. Содержание микроэлементов в серых лесных почвах Центрально-черноземной зоны // Агрохимия. 1965. № 9. С. 72–80.

12. Побединцева И. Г., Дианова Т. М. Микроэлементы в почвах и растениях ландшафтов широколиственных лесов (на примере Ставропольской возвышенности) // Почвоведение. 1988. № 10. С. 37-47.
13. Протасова Н. А., Беляев А. В. Биогеохимия микроэлементов в серых лесных почвах северо-западной части лесостепи среднерусской возвышенности // Черноземы Центральной России: генезис, эволюция и проблемы рационального использования. Воронеж: ВГУ, 2017. С. 153-162.
14. Дегтярева Т. В. Формирование микроэлементного состава темно-серых лесных почв Ставропольской возвышенности // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2021. № 4. С. 45-52.
15. Переломов Л. В., Пинский Д. Л. Формы Mn, Pb и Zn в серых лесных почвах Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2003. № 6. С. 682–691.
16. Катенарная биогеохимическая дифференциация в южно-таежных ландшафтах (Центрально-Лесной заповедник, Тверская область) / П. Р. Енчилик и др. // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 6. С. 121–133.

References

1. Kulintsev VV, Godunova EI, Zhelnakova L I, et al. New Generation Farming System of Stavropol Krai. Stavropol: Agrus; 2013. 520 p. (In Russ.).
2. Valkov VF, Shtompel YuA, Tyulpanov VI. Soil Science (Soils of the North Caucasus). Krasnodar: Sov. Kuban; 2002. 728 p. (In Russ.).
3. Shalnev VA. Evolution of Landscapes of the North Caucasus. Stavropol: Stavropol State University Publishing House; 2007. 310 p. (In Russ.).
4. Bogdanova MD. Methodology of Small-Scale Soil-Geochemical Mapping: Dis. ... Cand. of Geogr. Sciences: 25.00.23. Bogdanova Maria Danilovna. Moscow, 2004. 156 p. (In Russ.).
5. Guidance document. Methodological instructions. Methodology for measuring the mass fraction of acid-soluble forms of metals (copper, lead, zinc, nickel, cadmium, cobalt, chromium, manganese) in soil samples by atomic absorption analysis in the laboratories of the National Service for Environmental

- Pollution Monitoring and Control. RD 52.18.19189. Moscow, 1990. 32 p. (In Russ.).
6. Guidance document. Methodological instructions. Methodology for measuring the mass fraction of mobile forms of metals (copper, lead, zinc, nickel, cadmium, cobalt, chromium, manganese) in soil samples by atomic absorption analysis in the laboratories of the National Service for Environmental Pollution Monitoring and Control. RD 52.18.28990. Moscow, 1991. 35 p. (In Russ.).
 7. Smerek YuL, Volkova VI, Barekova MV, Badakhova GK. Fog climatology in the Central Ciscaucasia. Science. Innovations. Technologies. 2023;(2):143-176. (In Russ.).
 8. Protasova NA. Microelements in chernozems and gray forest soils of the Central Chernozem region: Abstract of a PhD thesis: 03.00.27. Protasova Nina Alekseevna. Voronezh; 2002. 40 p. (In Russ.).
 9. Dzybov DS. Vegetation of Stavropol Krai. Stavropol: AGRUS; 2018. 492 p. (In Russ.).
 10. Dyachenko VV. Geochemistry, systematics and assessment of the state of landscapes of the North Caucasus. Rostov-on-Don: Complex; 2004. 268 p. (In Russ.).
 11. Akhtyrtsev BP. Microelement Contents in Gray Forest Soils of the Central Chernozem Zone // Agrochemistry. 1965;(9):72-80. (In Russ.).
 12. Pobedintseva IG, Dianova TM. Microelements in Soils and Plants of Broad-Leafed Forest Landscapes (using the Stavropol Upland as an Example). Soil Science. 1988;(10):37-47. (In Russ.).
 13. Protasova NA, Belyaev AV. Biogeochemistry of Microelements in Gray Forest Soils of the Northwestern Forest-Steppe of the Central Russian Upland. Chernozems of Central Russia: Genesis, Evolution, and Problems of Rational Use. Voronezh: VSU; 2017. P. 153-162. (In Russ.).
 14. Degtyareva TV. Formation of the microelement composition of dark gray forest soils of the Stavropol Upland. News of higher educational institutions. North Caucasus region. Natural sciences. 2021;(4):45-52. (In Russ.).
 15. Perelomov LV, Pinsky DL. Forms of Mn, Pb, and Zn in gray forest soils of the Central Russian Upland. Soil Science. 2003;(6):682-691. (In Russ.).
 16. Enchilik PR, Semenov IN, Aseeva EN, Samonova OA,

Iovcheva AD, Terskaya EV. Catenary biogeochemical differentiation in southern taiga landscapes (Central Forest Reserve, Tver Region). Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography. 2020;(6):121-133. (In Russ.).

Информация об авторе

Татьяна Васильевна Дегтярева – кандидат географических наук, доцент, доцент департамента географии и геоинформатики Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 57196119839, Researcher ID: KLE-1800-2024.

Information about the author

Tatyana V. Degtyareva – Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Chair of the Department of Geography and Geoinformatics, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 57196119839, Researcher ID: KLE-1800-2024.

1. ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ
1.6.12. Физическая география и биогеография,
география почв и геохимия ландшафтов
(географические науки)



Научная статья
УДК 551.3 (470.65)
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.2>

**СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ТРАНСФОРМАЦИИ
ПРИЛЕДНИКОВЫХ ЛАНДШАФТОВ ЛЕДНИКА
БОЛЬШОЙ АЗАУ В ПРИЭЛЬБРУСЬЕ
ЗА ПЕРИОД 2015–2025 ГГ.**

**Алексей Владимирович Лысенко¹,
Николай Владимирович Сопнев^{2*},
Юрий Stanisлавович Власов³**

- 1, 2, 3 Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина,
Ставрополь, 355017, Российская Федерация)
1 avlysenko@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-5323-8344>
2 sopnev.stav@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0640-6699>
3 yvlass@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0003-9480-0227>
* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

В работе выполнен спутниковый мониторинг изменений состояния границ ледника Большой Азау и трансформации приледниковых ландшафтов за период 2015–2025 гг. На основе мультиспектральных данных Sentinel-2 (Level-2A) с использованием индекса нормализованной разницы снега (NDSI), визуального дешифрирования и индекса NDVI проведены оценка динамики площади ледника, соотношения чистого и покрытого мореной льда, а также особенностей первичной сукцессии на отложенных моренах.

Установлено, что за десять лет общая площадь ледника сократилась на 4,53 км² (24,1 %). Доля покрытого мореной льда увеличилась с 2,9 % до 50,4 %, при этом произошло активное преобразование покрытого мореной льда в отложенные, освободившиеся ото льда, моренные отложения, площадь которых составила 4,45 км². Анализ индекса NDVI на этих моренах выявил крайне низкие значения NDVI (среднее 0,0018), что свидетельствует о начальной стадии первичной сукцессии или её практическом отсутствии.

Полученные результаты указывают на сохранение высокой геоморфологической нестабильности перигляциальной зоны и повышенный риск гляциальных селей в верховьях бассейна р. Баксан. Показано, что даже временное замедление темпов дегляциации не гарантирует стабилизации ландшафтов. Использование геоинформационного анализа и технологий дистанционного зондирования Земли обеспечило высокую точность

расчетов и широкие временные рамки для мониторинга и исследования динамики изменений поверхности ледника, а также позволило выявить пространственно-временные особенности деградации оледенения и проанализировать трансформацию прилегающих геосистем в условиях современных климатических изменений.

Ключевые слова: приледниковые ландшафты, дегляциация, перигляциальные процессы, спутниковый мониторинг, Sentinel-2, NDSI, NDVI, опасные геоморфологические процессы

Для цитирования: Лысенко А.В., Сопнев Н.В., Власов Ю.С. Спутниковый мониторинг трансформации приледниковых ландшафтов ледника Большой Азау в Приэльбрусье за период 2015–2025 гг. // Наука. Инновации. Технологии. 2026. № 2. С. 29–52. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.2>

Конфликт интересов: доктор географических наук, доцент Лысенко А.В. является членом редакционной коллегии журнала «Наука. Инновации. Технологии». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанным с этой рукописью.

Статья поступила в редакцию 01.02.2026;
одобрена после рецензирования 05.04.2026;
принята к публикации 15.06.2026.

**1.6.12. Physical geography and biogeography, soil geography
and landscape geochemistry (geographical sciences)**
Research article

**Satellite monitoring of changes in the state
and boundaries of the Bolshoy Azau glacier
and transformation of periglacial landscapes
in Prielbrusye over 2015–2025**

**Alexey V. Lysenko¹,
Nikolay V. Sopnev^{2*},
Yuri S. Vlasov³**

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

¹ avlysenko@ncfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5323-8344>

² sopnev.stav@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0640-6699>

³ yvlass@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0003-9480-0227>

* Corresponding author

Abstract.

The study presents satellite monitoring of changes in the state and boundaries of the Bolshoy Azau Glacier and the transformation of periglacial landscapes over the period 2015-2025. Based on Sentinel-2 (Level-2A) multispectral data, using the Normalized Difference Snow Index (NDSI), visual interpretation, and the NDVI vegetation index, the assessment of glacier area dynamics, the ratio of clean and debris-covered ice, and the features of primary succession on deposited moraines was made.

It was established that over the ten-year period the total glacier area decreased by 4.53 km² (24.1%). The proportion of debris-covered ice increased from 2.9% to 50.4%, accompanied by the active transformation of debris-covered ice into deglaciated moraine deposits, the area of which reached 4.45 km². Analysis of NDVI values on these moraines revealed extremely low values (mean 0.0018), indicating the initial stage of primary succession or its near absence. The obtained results indicate the persistence of high geomorphological instability within the periglacial zone and an increased risk of glacial debris flows in the upper reaches of the Baksan River basin. It is shown that even a temporary slowdown in deglaciation rates does not guarantee landscape stabilization. The use of geoinformation analysis and remote sensing technologies ensured high accuracy of calculations and broad temporal coverage for monitoring and studying the dynamics of glacier surface changes, and also allowed identification of the spatiotemporal patterns of glaciation degradation and analysis of the transformation of adjacent geosystems under contemporary climate change conditions.

Keywords:

periglacial landscapes, deglaciation, periglacial processes, satellite monitoring, Sentinel-2, NDSI, NDVI, geomorphological hazards

For citation:

Lysenko AV, Sopnev NV, Vlasov YuS. Satellite monitoring of changes in the state and boundaries of the Bolshoy Azau glacier and transformation of periglacial landscapes in Prielbrusye over 2015–2025. *Science. Innovations. Technologies*. 2026;(2):29-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.2>

Conflict of interest:

Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor A.V. Lysenko is 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 01.02.2026;
approved after reviewing 05.04.2026;
accepted for publication 15.06.2026.

Введение

Современное изменение климата сопровождается ускоренным сокращением площади и массы горных ледников в большинстве высокогорных регионов мира. Особенно интенсивные процессы дегляциации наблюдаются в Альпах, Гималаях, на Памире, Тянь-Шане и Кавказе [1–4]. В начале XXI века в пределах Приэльбрусья наблюдается усиление процессов деградации современного оледенения, в том числе ледника Большой Азау. Согласно данным дистанционного зондирования, площадь оледенения Эльбруса в период 1997–2017 гг. уменьшилась на 10,8 % при среднем темпе сокращения около 0,51 % в год [5]. По данным Росгидромета, одним из наиболее интенсивно деградирующих ледников Северного Кавказа является ледник Большой Азау, расположенный на южных склонах Эльбруса (43,28° с.ш., 42,44° в.д.). За период 1957–2020 гг. площадь ледника сократилась на 6,35 км² (32,4 %). При этом в последние годы скорость деградации оледенения Эльбруса возросла почти в пять раз и достигла 1,25 км² в год [6]. Этот ледник представляет собой значимый природный объект как в научном, так и в социальном аспекте, представляющем популярную туристическую зону региона.

Особенностью ледника Большой Азау является высокая доля моренопокрытого льда, которая активно возрастает в последние десятилетия. Формирование мощного моренного покрова существенно влияет на интенсивность абляции: тонкий слой морены (менее 5–10 см) снижает отражательную способность ледника и ускоряет таяние, в то время как мощный моренный покров (>30–50 см) выступает в роли теплоизолятора, замедляя потери массы [11–13]. Этот двойственный эффект делает моренопокрытые участки ледников особенно чувствительными индикаторами климатических изменений.

Моренопокрытые участки ледников представляют особый интерес для исследований современной деградации ледников, поскольку наличие моренного покрова существенно изменяет механизмы абляции и динамику разрушения ледникового языка. Формирование моренного материала на поверхности ледника связано как с поступлением обломочного материала со склонов, так и с его вытаиванием из внутренних частей ледника и последующим пере-

распределением под действием гравитационных и водно-эрозионных процессов [11–13]. В результате в пределах одного ледникового языка могут одновременно наблюдаться участки ускоренной и замедленной деградации.

Нетривиальную научную задачу представляет собой дешифрирование участков моренопокрытого льда по спутниковым данным. Из-за спектрального сходства моренных поверхностей и участков деградирующего льда автоматическое выделение границ ледника становится менее точным и требует применения методов визуального дешифрирования и анализа разновременных данных [12, 13]. По мере деградации ледника моренопокрытые участки постепенно трансформируются в отложенные морены, формируя нестабильные приледниковые геосистемы.

Таяние ледников сопровождается не только сокращением их площади, но и резкой трансформацией приледниковых ландшафтов. Освобождение значительных территорий от льда приводит к формированию нестабильных геоморфологических комплексов, активизации склоновых процессов, оползней, термокарста и повышению селевой опасности. Приледниковые зоны в период дегляциации претерпевают значительные изменения, что вызывает ряд перигляциальных процессов. Эти процессы связаны с адаптацией геоморфологических систем к новым условиям после таяния льда. Молодой моренный рельеф отличается высокой неустойчивостью. Рыхлый обломочный материал активно перемещается, а растительность не успевает его закрепить. В сочетании с интенсивным таянием льда и ростом объёма талых вод это способствует активизации склоновых процессов, линейной эрозии и формированию селевых потоков [14, 15].

В бассейне реки Баксан в последние годы наблюдается рост числа гляциальных и смешанных селевых потоков, что напрямую связано с деградацией ледников, формированием новых моренных озёр и увеличением объёмов нестабильного рыхлого материала [16, 17]. Особенно опасны участки, где таяние ледников приводит к образованию локальных углублений, переувлажнённых комплексов морен и небольших приледниковых озёр. Разрушение неустойчивых моренных валов и резкое увеличение поверхностного стока способны спровоцировать мощные гляциальные и гля-

циально-селевые процессы. Такие явления создают серьёзную угрозу для всей туристической инфраструктуры Приэльбрусья – канатных дорог, горнолыжных комплексов, туристических баз, – а также для автомобильных дорог и важных гидротехнических объектов, включая Баксанскую ГЭС и системы орошения в Кабардино-Балкарии.

В этих условиях особенно востребованы современные методы спутникового мониторинга. Данные Sentinel-2 уровня Level-2A позволяют в высоком пространственном разрешении (10 м) и с хорошей временной детализацией отслеживать изменения ледников и приледниковых ландшафтов. Мультиспектральные снимки особенно ценны в труднодоступных высокогорных районах, где организация регулярных наземных наблюдений крайне сложна и дорогостояща. Благодаря высокой повторяемости съёмки Sentinel-2 открывается возможность анализировать многолетнюю динамику ледниковых систем и выявлять пространственные особенности деградации отдельных участков ледникового языка [18].

Для решения этих задач широко используются спектральные индексы. Нормализованный индекс разницы снега (NDSI) хорошо зарекомендовал себя для выделения снежно-ледовых поверхностей, индекс NDVI – для оценки состояния и развития растительности, а NDWI – для картирования водных объектов и участков переувлажнения [18–20]. Комплексное применение мультиспектрального анализа даёт возможность одновременно оценивать изменение площади ледника, динамику моренопокрытого льда, формирование новых отложенных моренных поверхностей и ход первичной сукцессии растительности. Такой подход оказывается особенно эффективным при изучении современных процессов трансформации приледниковых геосистем.

Несмотря на довольно большое количество публикаций, посвящённых общей динамике оледенения Кавказа [5, 7, 8, 21], детальная информация о трансформации моренопокрытого льда в отложенные моренные отложения, о площадях, вновь образованных морен и, особенно, о скорости первичной сукцессии растительности на них для ледника Большой Азау остаётся явно недостаточной. Большинство существующих работ сосредоточено преимущественно на оценке изменений общей площади оледенения, в то время как

процессы перестройки приледниковых ландшафтов и связанные с ними геоморфологические риски изучены значительно слабее.

Настоящее исследование призвано восполнить этот пробел. С помощью комплексного мультиспектрального анализа данных Sentinel-2 за период 2015–2025 гг. проведена количественная оценка деградации ледника Большой Азау, динамики моренопокрытого льда, формирования новых моренных поверхностей и уровня геоморфологических рисков в приледниковой зоне.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования является ледник Большой Азау и его приледниковая зона в Приэльбрусье. Анализ проводился в пределах контура ледника по Randolph Glacier Inventory (RGI 7.0).

Исследование основано на использовании мультиспектральных спутниковых данных Sentinel-2 Level-2A за 27 августа 2015 г., 5 августа 2020 г. и 23 августа 2025 г. Выбор летних снимков с минимальной облачностью обусловлен необходимостью наиболее корректного выделения ледниковых, моренных и приледниковых поверхностей в период максимального сокращения сезонного снежного покрова.

Обработка и анализ данных выполнялись в программной среде QGIS с применением методов спектрального и геоинформационного анализа. Для автоматизированного выделения чистого льда использовался индекс нормализованной разницы снега (NDSI), рассчитываемый по формуле:

$$\text{NDSI} = (B3 - B11) / (B3 + B11).$$

В качестве порогового значения использовалось значение 0,45, широко применяемое при дешифрировании горных ледников по данным Sentinel-2 и Landsat [18, 20]. Данный порог обеспечивает устойчивое отделение снежно-ледовых поверхностей от морен, горных пород и затенённых участков рельефа.

Моренопокрытый лёд выделялся методом визуального дешифрирования на основе анализа спектральных особенностей поверхности, текстурных признаков и морфологии ледникового языка. Новые моренные поверхности определялись как территории,

освободившиеся ото льда в результате отступления границ ледника между 2015 и 2025 гг. 2020 год выбран промежуточным этапом для анализа темпов динамики исследуемых процессов.

Для оценки состояния растительности в пределах молодых моренных комплексов использовался индекс нормализованной разницы растительности (NDVI). Выделение водных объектов и участков переувлажнения выполнялось с использованием индекса нормализованной разницы воды (NDWI).

После классификации выполнялась векторизация полученных данных и автоматизированный расчёт площадных характеристик выделенных геосистем. Все расчёты площадей выполнялись в проекции UTM 38N (EPSG:32638). Для обеспечения сопоставимости результатов с данными Randolph Glacier Inventory к полученным значениям добавлена постоянная площадь верхней области питания (0,514 км²).

Следует учитывать, что точность выделения границ ледника ограничивается пространственным разрешением Sentinel-2, наличием теневых участков и сложностью дешифрирования моренопокрытого льда. Наиболее высокая неопределённость характерна для периферийных частей языка ледника, где происходит интенсивное смешение ледникового материала с моренными отложениями. Использование визуального дешифрирования в сочетании с индексным анализом позволило снизить ошибки автоматической классификации.

Результаты исследований и их обсуждение

За период 2015–2025 гг. ледник Большой Азау претерпел значительную деградацию и глубокую трансформацию приледниковых ландшафтов. Общая площадь ледника сократилась с 18,794 км² в 2015 году до 14,264 км² в 2025 году, то есть на 4,53 км² (24,1 %).

Процесс деградации носил ярко выраженный неравномерный характер. Наиболее интенсивное сокращение площади произошло в первое пятилетие (2015–2020 гг.) – на 3,03 км² (16,1 %). В следующие пять лет (2020–2025 гг.) темпы сокращения заметно снизились – до 1,50 км² (9,5 %). Такая неравномерность динамики типична для современных горных ледников и отражает колебания климатических условий в разные периоды.

Для выделения снежно-ледовых поверхностей использовался индекс нормализованной разницы снега (NDSI), основанный на различиях отражательной способности снега и льда в зелёном и коротковолновом инфракрасном диапазонах спектра. Расчёт индекса выполнялся по данным каналов B3 и B11 спутниковой системы Sentinel-2 по формуле: $NDSI = (B3 - B11) / (B3 + B11)$. Использование NDSI позволяет эффективно отделять снежно-ледовые поверхности от горных пород, моренных отложений и затенённых участков рельефа. В рамках исследования в качестве порогового значения использовалось значение 0,45, широко применяемое при дешифрировании горных ледников по данным Sentinel-2 и Landsat. Полученные результаты дополнительно корректировались методом визуального дешифрирования, поскольку автоматическая классификация ограничено применима для участков моренопокрытого льда, обладающих спектральным сходством с окружающими моренными поверхностями.

Одной из наиболее ярких особенностей динамики ледника является активный переход моренопокрытого льда в отложенные, освободившиеся ото льда, моренные отложения. Значительная часть участков, которые в 2015 году представляли собой моренопокрытый лёд, к 2020 году уже превратилась в отложенные морены. Аналогичная тенденция сохранилась и в период 2020–2025 гг., хотя и в меньших масштабах. Такой характер трансформации свидетельствует о значительном таянии льда под моренным покровом.

Площадь новых морен, сформировавшихся в период с 2015 по 2025 годы, составила 4,45 квадратных километра. Этот показатель указывает на интенсивную трансформацию приледниковых ландшафтов, высокую скорость деградации ледникового языка и активное формирование нестабильных гляциальных геосистем. Для сравнительного анализа следует отметить, что на многих ледниках Памира, за этот же временной промежуток, их площадь сократилась на 14–16 %, в то время как на леднике Большой Азау этот показатель составил 24,1 %.

Важную роль в стабилизации приледниковых ландшафтов играет растительный покров на моренах. В условиях высокогорья первичная сукцессия обычно начинается с появления лишайников, мхов и пионерных травянистых видов. Аналогичные процессы на-

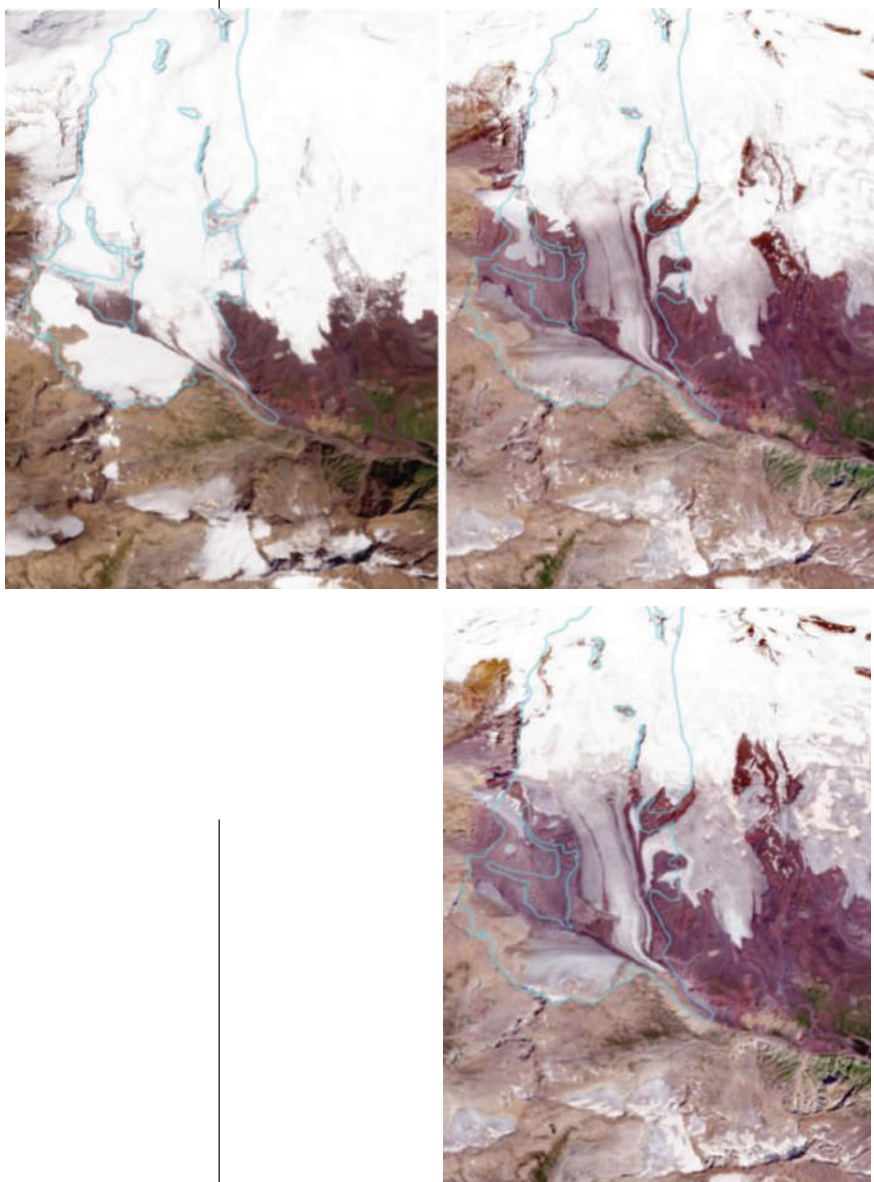


Рис. 1.

Ледник Большой Азау с границами Randolph Glacier Inventory (RGI 7.0) в натуральных цветах (True Color) в 2015, 2020 и 2025 гг.

Fig. 1. Bolshoy Azau Glacier in true color in 2015, 2020 and 2025 (boundary comparison).

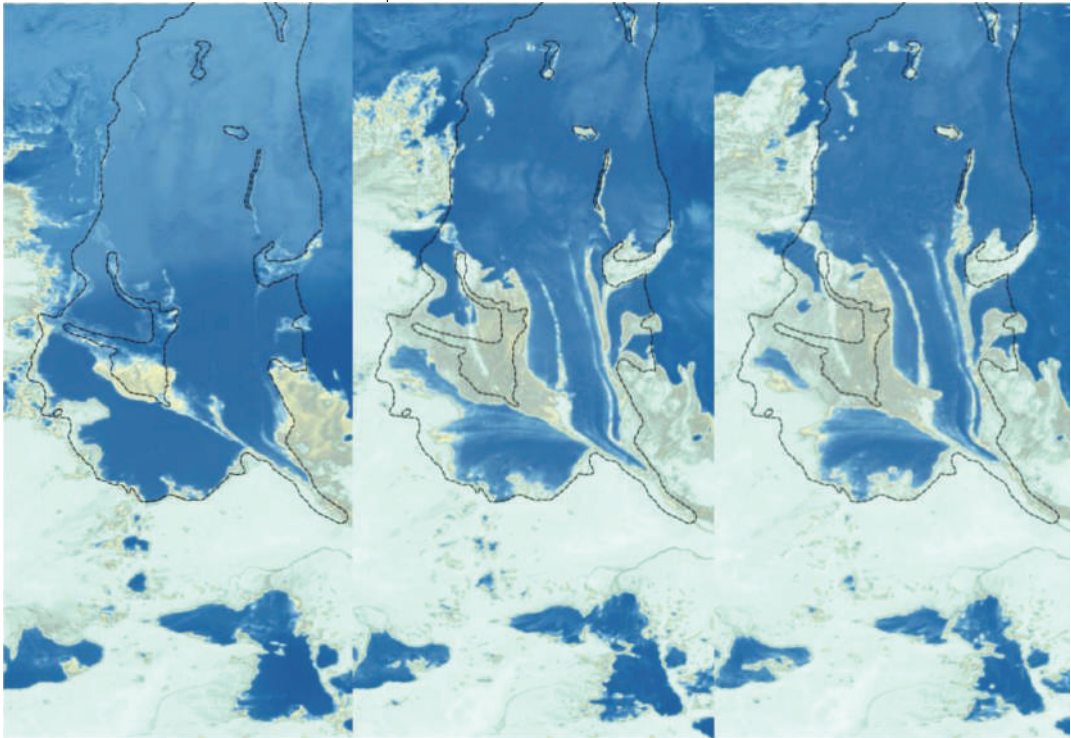


Рис. 2.

Визуализация снимка. Рассчитанный индекс нормализованной разницы снега (NDSI).
Fig. 2. Visualization of the satellite image and the calculated Normalized Difference Snow Index (NDSI).

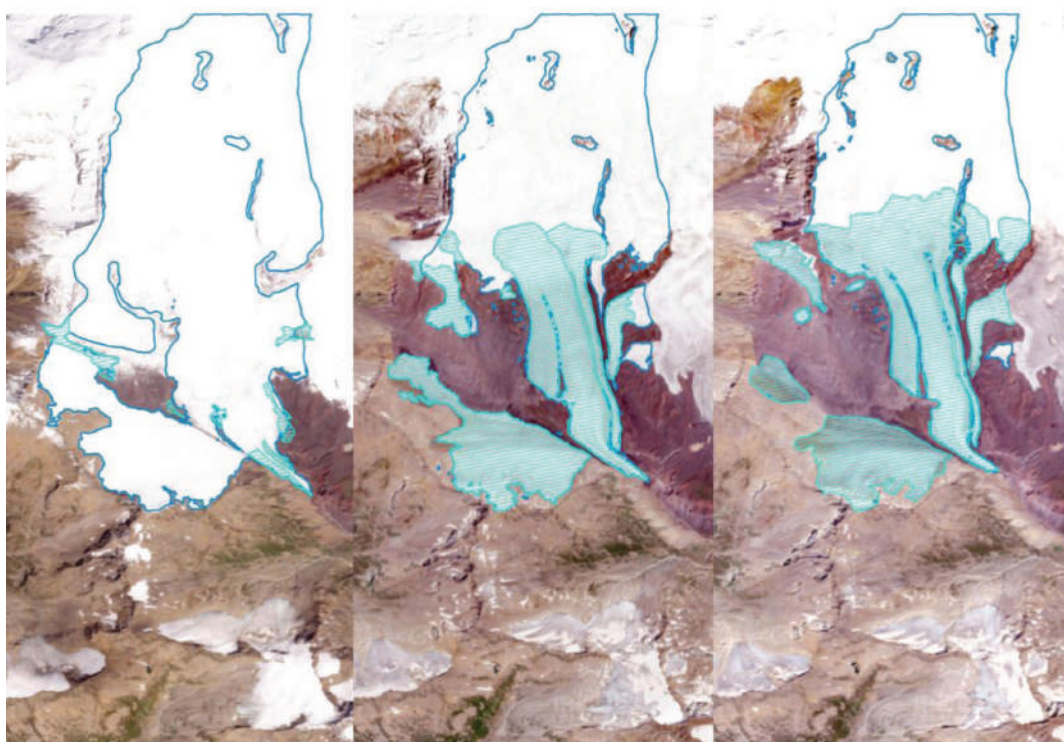


Рис. 3.

**Распределение чистого льда и моренопокрытого льда
в 2015, 2020 и 2025 гг.**

Fig. 3. Distribution of clean ice and debris-covered ice in 2015, 2020
and 2025.

Таблица 1. ДИНАМИКА ПЛОЩАДИ ЛЕДНИКА БОЛЬШОЙ АЗАУ В 2015–2025 ГГ.
Table 1. Dynamics of the Greater Azau Glacier area in 2015–2025

Год	Общая площадь, км²	Чистый лёд, км²	Морено- покрытый лёд, км²	Доля морено- покрытого льда, %
2015	18,8	18,2	0,5	2,9
2020	15,8	9,644	6,1	38,8
2025	14,3	7,074	7,2	50,4
Изменение 2015–2025	-4,5 (-24,1 %)	-11,2	+6,6	+47,5

блюдаются на ледниках Альп, где на моренах за 10–15 лет формируется начальный растительный покров, способствующий стабилизации склонов [21, 22]. На Памире темпы первичной сукцессии также выше, чем на Большом Азау.

Однако анализ индекса NDVI на новых моренах ледника Большой Азау показал крайне низкие значения (среднее 0,0018, медиана 0,0039). Это свидетельствует о крайне медленной первичной сукцессии или её практическом отсутствии. Низкая степень зарастания сохраняет высокую нестабильность моренных отложений и существенно повышает риск их размыва, оползневых процессов и формирования грязекаменных потоков.

Однако анализ индекса NDVI на новых моренах ледника Большой Азау показал крайне низкие значения (среднее 0,0018, медиана 0,0039). Это свидетельствует о том, что первичная сукцессия растительности на свежих моренных отложениях находится на самой начальной стадии или практически отсутствует.

Оценка геоморфологических и гидрологических рисков. Низкая степень зарастания морен сохраняет их высокую нестабильность и существенно повышает вероятность эрозионных, оползневых и селевых процессов. В условиях продолжающейся дегляциации высокогорий сохраняется потенциальная угроза возникновения гляциальных селей в верховьях бассейна р. Баксан. Увеличение

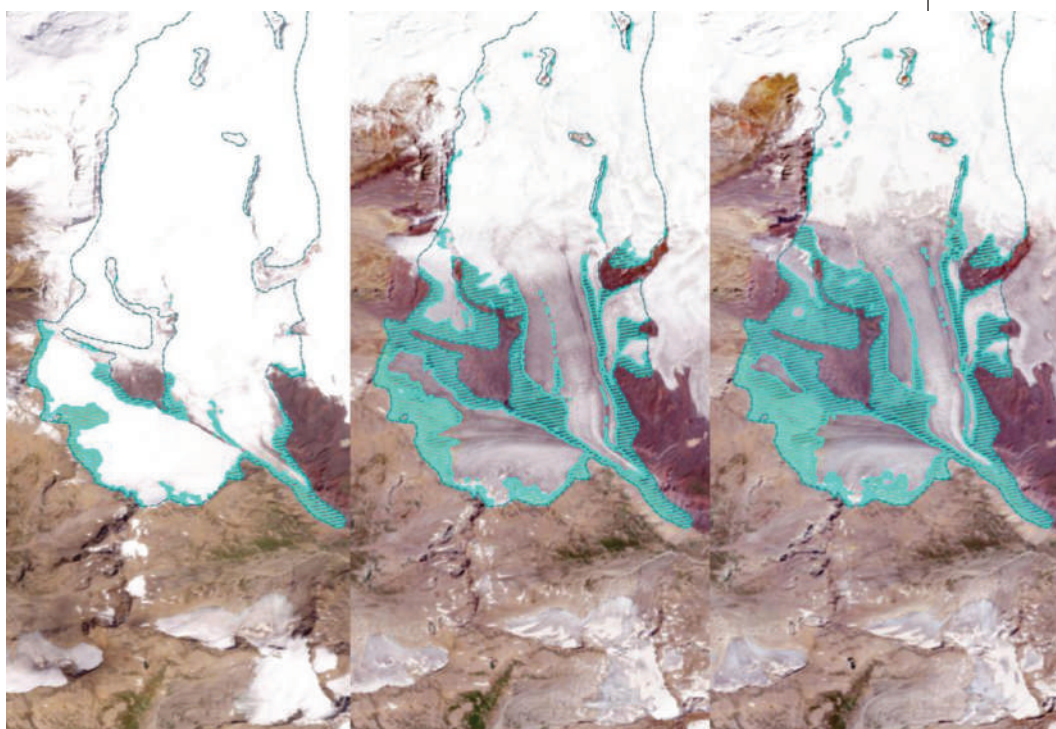


Рис. 4.

Пространственное распространение новых морен в 2015, 2020 и 2025 гг.

Fig. 4. Spatial distribution of new moraines in 2015, 2020, 2025.

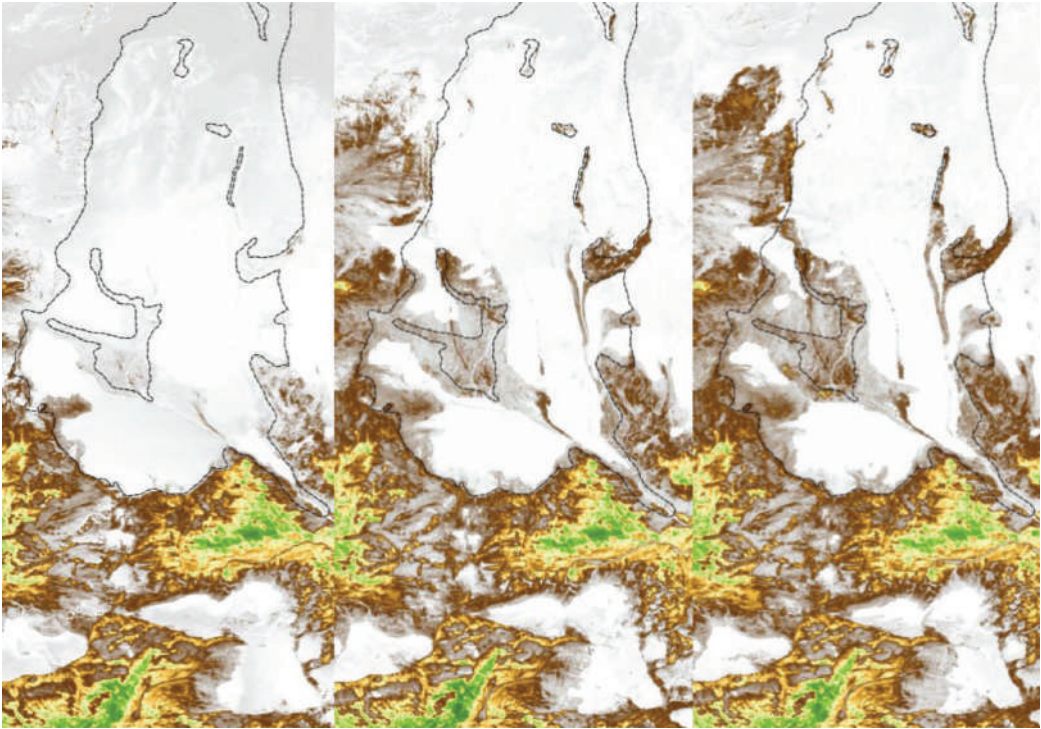


Рис. 5.

Пространственное распределение индекса NDVI на новых отложенных моренах в 2015, 2020, 2025 гг.

Fig. 5. Spatial distribution of the NDVI index on newly deglaciated moraine deposits in 2015, 2020, and 2025.

объёма нестабильного моренного материала в сочетании с ростом поверхностного увлажнения (отмеченным по индексу NDWI) может провоцировать грязекаменные потоки, способные распространяться на значительные расстояния вниз по долине и представлять серьёзную опасность для туристической инфраструктуры Приэльбрусья (горнолыжные комплексы, канатные дороги, туристические базы и автодороги).

Аналогичные риски наблюдаются в других горных регионах. В Альпах ускоренная дегляциация и низкие темпы зарастания морен уже привели к активизации селевых процессов и необходимости усиления мер безопасности на туристических маршрутах [18, 19]. На Памире темпы первичной сукцессии на моренах заметно выше, что частично снижает риски по сравнению с Центральным Кавказом.

По скорости потери площади ледник Большой Азау демонстрирует более высокие темпы деградации (–24,1 % за 10 лет), чем многие ледники Памира (в среднем 1,17 % за 2000–2017 гг.). Это указывает на более чуткую реакцию кавказских ледников на современные климатические изменения.

В долгосрочной перспективе после прохождения пика талых вод – прогнозируется устойчивое снижение ледникового питания реки Баксан. Это приведёт к увеличению сезонной неравномерности стока, риску летнего маловодья и дефициту воды в нижележащих районах. Такие изменения могут негативно сказаться на работе Баксанской ГЭС (снижение выработки электроэнергии в летний период) и на системах орошения сельскохозяйственных земель Кабардино-Балкарской Республики, где ледниковый сток играет ключевую роль в обеспечении водой региона в засушливые месяцы.

Таким образом, даже наблюдаемое в 2020–2025 гг. некоторое замедление темпов сокращения площади ледника, не гарантирует стабилизации геосистемы. Современный тренд деградации горных ледников Большого Кавказа демонстрирует более высокую ее интенсивность по сравнению с Памиром и сопоставим с наиболее быстро деградирующими ледниками Альп, что подчёркивает актуальность постоянного мониторинга приледниковых ландшафтов.

Таким образом, наблюдаемая трансформация приледниковых ландшафтов характеризуется быстрым замещением ледниковых по-

верхностей моренными комплексами, что приводит к увеличению площади нестабильных элементов рельефа и сохранению высокого уровня геоморфологических рисков в верховьях бассейна р. Баксан.

Заключение

Проведённый спутниковый мониторинг показал, что в 2015–2025 гг. ледник Большой Азау продолжал активно сокращаться, а приледниковые ландшафты подвергаются интенсивной трансформации. За рассматриваемый период площадь ледника уменьшилась на 4,53 км² (24,1 %), что указывает на высокие темпы современной деградации оледенения в пределах южного склона Эльбруса. Наиболее интенсивное сокращение площади наблюдалось в 2015–2020 гг. В последующие годы темпы дегляциации несколько снизились, однако процесс разрушения ледникового языка сохранялся.

Одним из наиболее заметных результатов исследования стало резкое увеличение площади моренопокрытого льда. Если в 2015 г. такие участки занимали лишь небольшую часть поверхности ледника, то к 2025 г. их доля превысила 50 %. Одновременно происходило активное преобразование моренопокрытого льда в отложенные моренные поверхности. Значительная часть участков, фиксировавшихся в 2015 г. как моренопокрытый лёд, уже к 2020 г. перешла в категорию отложенных морен. Подобная динамика отражает продолжающееся разрушение нижней части ледникового языка и активное формирование новых парагляциальных комплексов.

Площадь отложенных морен, сформировавшихся за период исследования, составила 4,45 км². Формирование таких площадей рыхлообломочного материала свидетельствует о существенной перестройке перигляциальной зоны. Полученные результаты показывают, что современная дегляциация сопровождается не только сокращением площади ледника, но и быстрым изменением структуры приледниковых геосистем.

Анализ распределения NDVI на молодых моренных отложенных моренах выявил крайне низкие значения индекса. Это указывает на слабую выраженность процессов первичной сукцессии и низкую степень закрепления моренных отложений растительностью. Вероятно, основными ограничивающими факторами являются су-

ровые высокогорные условия, дефицит мелкозёма и высокая подвижность рыхлого материала. В результате значительная часть новых морен сохраняет высокую эрозионную уязвимость.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что даже при временном замедлении темпов дегляциации процессы трансформации приледниковых ландшафтов будут продолжаться ещё длительное время. Рост площади незакреплённых моренных отложений способствует активизации склоновых процессов, усилению эрозии рыхлых материалов под воздействием талых вод и формированию селевых потоков. Эта проблема особенно наиболее отмечается в верховьях бассейна реки Баксан, где расположены многочисленные туристические объекты, транспортная инфраструктура, оросительные системы и Баксанская ГЭС.

Результаты работы подтверждают высокую эффективность использования спутниковых данных Sentinel-2 для мониторинга современных ледников и приледниковых ландшафтов. Сочетание индексного анализа (NDSI, NDVI, NDWI), визуального дешифрирования и геоинформационных методов даёт возможность проводить регулярную и достаточно точную оценку динамики оледенения и связанных с ней природных рисков исключительно на основе открытых данных дистанционного зондирования Земли.

В целом полученные результаты подчёркивают острую необходимость организации регулярного мониторинга состояния ледника Большой Азау и перигляциальной зоны Центрального Кавказа. В условиях продолжающегося изменения климата деградация ледников приводит не только к сокращению их площади, но и к быстрому формированию обширных нестабильных моренных комплексов, которые представляют реальную потенциальную опасность для хозяйственной и туристической инфраструктуры Приэльбрусья.

Особого внимания требует контроль селевых рисков в верховьях бассейна р. Баксан. Рост площади рыхлых моренных отложений, увеличение объёма и интенсивности талых вод, а также появление переувлажнённых участков создают благоприятную обстановку для активизации грязекаменных потоков и других опасных геоморфологических процессов. Даже относительно локальные селевые события в этой зоне способны вызвать серьёзные повреждения автомобильных дорог, объектов туристической

инфраструктуры, линий электропередачи и гидротехнических сооружений.

В связи с этим материалы исследования могут быть использованы для актуализации карт природных опасностей Приэльбрусья и разработки мероприятий по снижению риска чрезвычайных ситуаций. Наиболее перспективным направлением представляется создание системы регулярного спутникового мониторинга, которая позволит оперативно отслеживать изменения площади ледника, состояние моренных комплексов и развитие потенциально опасных участков. Важным преимуществом такого подхода является возможность работать преимущественно с открытыми данными Sentinel-2, что делает регулярные наблюдения относительно доступными по стоимости и не требует постоянного проведения дорогостоящих полевых экспедиций в высокогорной зоне.

Особое значение в условиях высокой туристической нагрузки Приэльбрусья приобретает развитие систем предупреждения и оперативного реагирования на опасные гляциальные и селевые процессы. В разгар туристического сезона особенно важно поддерживать постоянную готовность специализированных аварийно-спасательных подразделений и техники быстрого реагирования в наиболее посещаемых участках долины реки Баксан. Это позволит существенно сократить время реагирования в случае внезапных селевых событий, локальных обвалов моренных склонов или подтоплений.

Такие системы могут включать сеть автоматизированных гидрометеорологических постов, датчики уровня воды в реках и озёрах, средства дистанционного мониторинга, а также централизованную передачу предупреждений через мобильную связь, приложения, туристические информационные центры и объекты горнолыжной инфраструктуры. Особую актуальность подобные меры приобретают в периоды интенсивного снеготаяния, обильных осадков и аномально высоких температур, когда вероятность формирования грязекаменных потоков резко возрастает.

Результаты проведённого исследования могут найти практическое применение при разработке новых туристических маршрутов и совершенствовании инфраструктуры в высокогорной зоне бассейна реки Баксан. Крайне важно учитывать происходящие изменения в приледниковых ландшафтах при планировании новых ту-

ристических объектов, размещении инженерных сооружений и выделении зон повышенного риска. Игнорирование этих динамичных процессов может привести к серьезным последствиям как для безопасности людей, так и для сохранности материальных объектов.

Список источников

1. Tielidze L. G., Wheate R. Glacier retreat in the Caucasus Mountains, Russia/Georgia/Azerbaijan, 1986–2014 // *The Cryosphere*. 2018. Vol. 12. P. 81–94. <https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>
2. Zemp M., Frey H., Gärtner-Roer I. et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century // *Journal of Glaciology*. 2015. Vol. 61. № 228. P. 745–762. <https://doi.org/10.3189/2015JoG15J017>
3. Hugonnet R., McNabb R., Berthier E. et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century // *Nature*. 2021. Vol. 592. P. 726–731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
4. Bolch T., Kulkarni A., Kääb A. et al. The state and fate of Himalayan glaciers // *Science*. 2012. Vol. 336. № 6079. P. 310–314. <https://doi.org/10.1126/science.1215828>
5. Postnikova M.V., Shahgedanova M., Toropov P.A. Mathematical modeling of Elbrus glaciers in the 21st century // *Ice and Snow*. 2024. Vol. 64. № 1. P. 12–25.
6. Об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год: доклад / Росгидромет. СПб.: Росгидромет, 2022. 378 с.
7. 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.
8. Петраков Д. А., Черноморец С. С. Деградация ледников Центрального Кавказа и связанные природные риски // *Геориск*. 2015. № 3. С. 42–50.
9. Тавасиев Р. А. Гляциальный сель с уникального ледника Кавказа // *Геоморфология*. 2019. № 2. С. 78–89.
10. Shahgedanova M., Nosenko G., Khromova T. et al. Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Caucasus from 1960 to 2014 // *Global and Planetary Change*. 2014. Vol. 113. P. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.07.005>

11. Stokes C. R. et al. Recent glacier retreat in the Caucasus Mountains // *Annals of Glaciology*. 2007. Vol. 46. P. 195–203.
12. Solomina O. N. Glacier fluctuations during the Holocene in the mountains of northern Eurasia // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2000. Vol. 159. P. 161–179.
13. Benn D. I., Evans D. J. A. *Glaciers and Glaciation*. London: Routledge, 2010. 802 p.
14. Nicholson L., Benn D. I. Calculating ice melt beneath a debris layer using meteorological data // *Journal of Glaciology*. 2006. Vol. 52. № 178. P. 463–470.
15. Scherler D., Bookhagen B., Strecker M. Himalayan glacier response to climate change affected by debris cover // *Nature Geoscience*. 2011. Vol. 4. P. 156–159. <https://doi.org/10.1038/ngeo1068>
16. Emmer A., Cochachin A. The causes and mechanisms of moraine-dammed lake failures in the Cordillera Blanca, Peru // *Geomorphology*. 2013. Vol. 224. P. 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.06.014>
17. Richardson S., Reynolds J. An overview of glacial hazards in the Himalayas // *Quaternary International*. 2000. Vol. 65–66. P. 31–47.
18. Черноморец С. С. Селевые процессы на Северном Кавказе. М.: Научный мир, 2012. 216 с.
19. Hall D. K., Riggs G. A., Salomonson V. V. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data // *Remote Sensing of Environment*. 1995. Vol. 54. P. 127–140.
20. Racoviteanu A. E., Williams M. W., Barry R. G. Optical remote sensing of glacier characteristics: a review with focus on the Himalaya // *Sensors*. 2008. Vol. 8. № 5. P. 3355–3383. <https://doi.org/10.3390/s8053355>
21. Paul F., Kääb A., Maisch M. et al. The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory // *Annals of Glaciology*. 2002. Vol. 34. P. 355–361.
22. Fischer A., Mair V., Huss M. et al. Rapid vegetation succession in recently deglaciated areas in the Alps // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2019. Vol. 51. № 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.1080/15230430.2019.1565843>
23. Ramskogler K., Winkler M., Pauli H. Primary succession on glacier forelands in high mountain environments // *Journal of Vegetation Science*. 2023. Vol. 34. № 2. P. 1–15. <https://doi.org/10.1111/jvs.13192>

References

1. Tielidze LG, Wheate R. Glacier retreat in the Caucasus Mountains, Russia/Georgia/Azerbaijan, 1986–2014. *The Cryosphere*. 2018;(12):81-94. <https://doi.org/10.5194/tc-12-81-2018>
2. Zemp M, Frey H, Gärtner-Roer I, et al. Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*. 2015;61(228):745-762. <https://doi.org/10.3189/2015JoG15J017>
3. Hugonnet R, McNabb R, Berthier E, et al. Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*. 2021;592:726-731. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436-z>
4. Bolch T, Kulkarni A, Kääb A, et al. The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*. 2012;336(6079):310-314. <https://doi.org/10.1126/science.1215828>
5. Postnikova MV, Shahgedanova M, Toropov PA. Mathematical modeling of Elbrus glaciers in the 21st century. *Ice and Snow*. 2024;64(1): 12-25.
6. Roshydromet. Report on Climate Features in the Russian Federation in 2021. Saint Petersburg: Roshydromet; 2022. 378 p.
7. Ryazanova NE, Kurakova AD, Gaysina AA. Analysis of the dynamics of snow cover of the Bolshoy Azau glacier (Kabardino-Balkaria) based on remote sensing and meteorological observations (2018–2024). *Science. Innovations. Technologies*. 2025;(4):85-104.
8. Petrakov DA, Chernomorets SS. Degradation of glaciers in the Central Caucasus and associated natural hazards. *Georisk*. 2015;(3):42-50. (In Russ.).
9. Tavasiev RA. A glacial debris flow from a unique glacier of the Caucasus. *Geomorfologiya*. 2019;(2):78-89. (In Russ.).
10. Shahgedanova M, Nosenko G, Khromova T, et al. Glacier shrinkage and climatic change in the Russian Caucasus from 1960 to 2014. *Global and Planetary Change*. 2014;113:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.07.005>
11. Stokes CR, et al. Recent glacier retreat in the Caucasus Mountains. *Annals of Glaciology*. 2007;46:195-203.
12. Solomina ON. Glacier fluctuations during the Holocene in the mountains of northern Eurasia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2000;159:161-179.

13. Benn DI, Evans DJA. *Glaciers and Glaciation*. London: Routledge; 2010. 802 p.
14. Nicholson L, Benn DI. Calculating ice melt beneath a debris layer using meteorological data. *Journal of Glaciology*. 2006;52(178):463-470.
15. Scherler D, Bookhagen B, Strecker M. Himalayan glacier response to climate change affected by debris cover. *Nature Geoscience*. 2011;4:156-159. <https://doi.org/10.1038/ngeo1068>
16. Emmer A, Cochachin A. The causes and mechanisms of moraine-dammed lake failures in the Cordillera Blanca, Peru. *Geomorphology*. 2013;224:32-43. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.06.014>
17. Richardson S, Reynolds J. An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*. 2000;65-66:31-47.
18. Chernomorets SS. Selevye protsessy na Severnom Kavkaze [Debris flow processes in the North Caucasus]. Moscow: Nauchny mir; 2012. 216 p. (In Russ.).
19. Hall DK, Riggs GA, Salomonson VV. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*. 1995;54:127-140.
20. Racoviteanu AE, Williams MW, Barry RG. Optical remote sensing of glacier characteristics: a review with focus on the Himalaya. *Sensors*. 2008;8(5):3355–3383. <https://doi.org/10.3390/s8053355>
21. Paul F, Kääb A, Maisch M, et al. The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory. *Annals of Glaciology*. 2002;34:355-361.
22. Fischer A, Mair V, Huss M, et al. Rapid vegetation succession in recently deglaciated areas in the Alps. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2019;51(1):1–14. <https://doi.org/10.1080/15230430.2019.1565843>
23. Ramskogler K, Winkler M, Pauli H. Primary succession on glacier forelands in high mountain environments. *Journal of Vegetation Science*. 2023;34(2):1-15. <https://doi.org/10.1111/jvs.13192>

Информация об авторах

Алексей Владимирович Лысенко – доктор географических наук, доцент, профессор департамента географии и геоинформатики,

факультета международных отношений, Северо-Кавказский федеральный университет.

Сопнев Николай Владимирович – кандидат географических наук, доцент департамента географии и геоинформатики факультета международных отношений, Северо-Кавказский федеральный университет.

Власов Юрий Станиславович – студент департамента географии и геоинформатики факультета международных отношений, Северо-Кавказский федеральный университет.

Вклад авторов

Алексей Владимирович Лысенко – подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта.

Сопнев Николай Владимирович – анализ литературных источников, подготовка текста и редактирование картографических материалов.

Власов Юрий Станиславович – подготовка материалов ДЗЗ и проведение анализа, расчет и визуализация картографических материалов.

Information about the authors

Alexey V. Lysenko – Dr. Sc. (Geogr.), Associate Professor, Professor of the Department of Geography and Geoinformatics of the Faculty of International Relations, North-Caucasus Federal University.

Nikolay V. Sopnev – Cand. Sc. (Geogr.), Associate Professor, Department of Geography and Geoinformatics of the Faculty of International Relations, North-Caucasus Federal University.

Yuri S. Vlasov – student, Department of Geography and Geoinformatics of the Faculty of International Relations, North-Caucasus Federal University.

Contribution of the authors

Alexey V. Lysenko – preparation and editing of the text – drafting of the manuscript and the formation of its final version.

Nikolay V. Sopnev – literature review, manuscript preparation and editing of cartographic materials.

Yuri S. Vlasov – preparation of remote sensing data and conduct of analysis, calculation and visualization of cartographic materials.



Научная статья
УДК 314.7
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.3>

ЭТНИЧЕСКАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ УРБАНИЗАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОСТСОВЕТСКОЙ РОССИИ

Александр Александрович Черкасов¹,
Василий Васильевич Чихичин²

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

¹ cherkasov_stav@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6929-2345>

² wawachi@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9888-5331>

Аннотация.

Статья посвящена особенностям урбанизированности этносов, проживающих в России. Исследование основано на данных Всероссийской переписи населения 2021 года и Всесоюзной переписи населения 1989 года – единственных источниках, содержащих сведения об этническом составе городского и сельского населения на всех административно-территориальных уровнях. Авторами подготовлена база данных «Этнические процессы городского населения России», обработка которой выполнена с применением ГИС-платформы QGIS. Установлено, что из 194 этносов урбанизационный переход (доля горожан более 50 %) преодолели 98 этносов, концентрирующих 80,2 % всех горожан страны. Наиболее урбанизированы русские (76,3 %; 80,6 млн горожан), а также евреи (95 %), грузины (78 %), киргизы, узбеки и таджики. Умеренную урбанизированность (50–75 %) демонстрируют татары, украинцы, армяне. Наименее урбанизированы (менее 25 %) 35 этносов, включая 13 коренных малочисленных народов Севера. Для этносов с компактными ареалами расселения характерна внутрорегиональная урбанизация: титульные этносы сосредоточены в «своих» республиках, и особенно в региональных центрах. В постсоветский период наиболее значительно выросла доля горожан среди тувинцев, чукчей, чеченцев, лезгин и др., имеющих более низкие показатели урбанизированности в позднесоветский период. При этом у этносов, у которых к 1989 г. уже были высокие показатели урбанизированности, особых изменений не отмечается.

Ключевые слова: урбанизация, этнические процессы, городское население, урбанизационный переход, этносы России, расселение народов

Для цитирования: Черкасов А.А., Чихичин В.В. Этническая дифференциация урбанизационных процессов в постсоветской России // Наука. Инновации. Технологии. 2026. № 2. С. 53–70. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.3>

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00553, <https://rscf.ru/project/25-27-00553/>.

Конфликт интересов: Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанным с этой рукописью.

Статья поступила в редакцию 01.02.2026;
одобрена после рецензирования 13.05.2026;
принята к публикации 02.06.2026.

**1.6.13. Economic, social, political and recreational geography
(geographical sciences)**
Research article

**Ethnic differentiation of urbanization processes
in post-Soviet Russia**

**Aleksander A. Cherkasov¹,
Vasiliy V. Chikhichin²**

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

¹ cherkasov_stav@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6929-2345>

² wawachi@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9888-5331>

Abstract.

The article focuses on identifying urbanization features of ethnic groups residing in Russia. The study is based on data from the 2021 All-Russian Population Census and the 1989 All-Union Population Census – the only sources containing information on ethnic composition of urban and rural populations at all administrative-territorial levels. The authors have compiled a database

Ethnic Processes of the Urban Population in Russia, which was processed at QGIS GIS platform. It has been established that out of 194 ethnic groups, 98 have completed the urbanization transition (with the share of urban residents exceeding 50%), that amounts to 80.2% of the total urban population of the country. The most urbanized ethnic groups are Russians (76.3%; 80.6 million urban residents), as well as Jews (95%), Georgians (78%), Kyrgyz, Uzbeks, and Tajiks. Moderate urbanization (50-75%) is observed among Tatars, Ukrainians, and Armenians. The least urbanized (less than 25%) are 35 ethnic groups, including 13 small in number indigenous peoples of the North. For ethnic groups with compact settlement areas, intra-regional urbanization is typical: titular ethnic groups are concentrated in originally ethnic republics, and especially in regional capitals. In the post-Soviet period, the share of urban residents has grown most significantly among Tuvans, Chukchi, Chechens, Lezgins, and others, who had lower urbanization levels in the late Soviet period. At the same time, no significant changes are observed among ethnic groups that already had high urbanization rates by 1989.

Keywords: urbanization, ethnic processes, urban population, urbanization transition, ethnic groups of Russia, settlement of peoples

For citation: Cherkasov AA, Chikhichin VV. Ethnic differentiation of urbanization processes in post-Soviet Russia. Science. Innovations. Technologies. 2026;(2):53-70. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.3>

Funding: The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation grant No. 25-27-00553, <https://rscf.ru/en/project/25-27-00553/>.

Conflict of interest: The authors are not aware of any potential conflict of interest related to this manuscript.

The article was submitted 01.02.2026;
approved after reviewing 13.05.2026;
accepted for publication 02.06.2026.

Введение

XX столетие стало периодом кардинальной трансформации пространственной организации населения России. Страна прошла путь от аграрного к индустриальному и подошла к постиндустриальному обществу, что сопровождалось стремительной урбанизацией. Если в 1917 году доля горожан составляла лишь 17%, то к 1989 году показатель достиг 65,7%, а по итогам Всероссийской переписи населения 2021 года – 74,8%. Сегодня Россия относится к странам с высоким уровнем урбанизации, сопоставимым с Австралией (86,7%), США (83,1%), Канадой (81,9%) и Францией (78,8%), и опережает такие крупные государства, как Китай (67%) и Индия (37,6%).

При этом внутрироссийские урбанизационные процессы отличались ярко выраженной пространственной дифференциацией, обусловленной историей и спецификой хозяйственного освоения территории, а также сложившейся системой расселения [1]. Региональные диспропорции в распределении городского и сельского населения сохраняются и сегодня: от почти полностью урбанизированных Магаданской области (97,8%), Ханты-Мансийского автономного округа (91,9%), Кемеровской области (86,3%) до регионов с преимущественно сельским населением – Республики Алтай (28,8%), Чеченской Республики (34,4%), Карачаево-Черкесской Республики (42,8%). Именно эта пространственная неоднородность во многом определила дифференциацию этносов по степени их вовлеченности в урбанизационные процессы [2].

Изучение этнических аспектов урбанизации имеет важное значение, так как особенности сельского и городского расселения и образа жизни этносов важно учитывать при формировании и проведении демографической и миграционной политики, при планировании социально-экономического развития территорий их проживания. Цель данного исследования – выявление на основе данных переписей населения 1989 и 2021 года особенностей вовлеченности в урбанизационные процессы этносов в России в постсоветский период.

Материалы и методы исследований

Информационную базу составили данные Всероссийской переписи населения 2021 года и Всесоюзной переписи населения 1989 года [3; 4]. Выбор источников обусловлен тем, что переписи населения остаются единственными источниками информации об этническом составе населения России в разрезе городской и сельской местности на всех административно-территориальных уровнях. Среди большого количества исследований на данную тему отметим монографию «Этносы в пространстве современной России» [5], в которой анализируются этнические процессы с учетом полимасштабности, в том числе на основе детализированного анализа данных по всей совокупности городских округов, муниципальных районов и округов страны. Есть этнические сюжеты в «Миграционном атласе Российской Федерации» [6].

На основе официальной статистики авторами подготовлена и зарегистрирована база данных «Этнические процессы городского населения России»¹, включающая следующие показатели (в том числе расчетные за 2021 год):

- численность этносов в целом по России с разделением на городское и сельское население;
- доля этносов в структуре городского населения России;
- численность этносов по регионам России с разделением на городское и сельское население;
- доля этносов в структуре городского населения регионов;
- численность этносов по городским поселениям России;
- расчетные показатели доли этносов в городах России (от общей численности этноса и от численности городского населения этноса);

¹ Черкасов А.А., Чихичин В.В., Супрунчук И.П., Есикова В.О. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2026621155 от 19 марта 2026 года выданная Федеральной службой по интеллектуальной собственности (Роспатент)

- для титульных этносов национально-территориальных образований – их доля в региональных столицах и крупных городах.

Для ведения базы данных, построения геоинформационных моделей и картографических материалов использована ГИС-платформа QGIS [7].

Анализ проведен с градацией этносов по численности городского населения: более 1 млн человек; от 500 тыс. до 1 млн; от 250 до 500 тыс.; от 100 до 250 тыс.; от 50 до 100 тыс.; менее 50 тыс. человек.

Обозначим два ключевых понятия исследования.

Уровень урбанизированности этноса – это удельный вес городского населения этноса в его общей численности по России.

Урбанизационный переход этноса – преодоление порога в 50 % городского населения от общей численности этноса. Этноты с несостоявшимся урбанизационным переходом – доля городского населения от числа всего этноса не достигла 50 % [8].

С целью оценки уровня урбанизированности все этноты разделены на четыре группы:

- **преодолевшие урбанизационный переход (доля горожан более 50 %):**
наиболее урбанизированные: удельный вес городского населения этноса от общей численности этноса более 75 %;
умеренно урбанизированные: удельный вес городского населения этноса от общей численности этноса от 50 % до 75 %;
- **с несостоявшимся урбанизационным переходом (доля горожан менее 50 %):**
менее урбанизированные: удельный вес городского населения этноса от общей численности этноса от 25 % до 50 %;
с низким уровнем урбанизированности: удельный вес этноса от общей численности этноса менее 25 %.

Примечание: в переписи 2021 года 15 млн человек (из них 92,6% – горожане) не указали свою национальность, что следует учитывать при интерпретации абсолютных показателей.

Результаты исследований и их обсуждение

В России в 2021 году численность горожан составила 110,1 млн чел., что соответствует 74,8% от общего населения страны (147,2 млн чел.). Из 194 этносов, зафиксированных Всероссийской переписью населения 2021 г., урбанизационный переход преодолели 98. Их общая численность городского населения 88,2 млн чел., что соответствует 80,2% от числа всех горожан страны. Не преодолели урбанизационный переход 96 этносов с общим числом горожан 21,8 млн чел. (19,8% от числа всех горожан страны).

К наиболее урбанизированным относятся 55 этносов с общей численностью горожан 81,7 млн чел. Русские, будучи крупнейшим этносом России, составляют подавляющее большинство городских жителей – 80,6 млн чел., или 73,2% от общего числа горожан. Их уровень урбанизированности достигает 76,3%, что немного выше среднего по стране (74,8%). Именно русские, как самая многочисленная этническая группа, в значительной мере определили общероссийский уровень урбанизации.

К этой группе относятся четыре этноса с численностью от 100 до 500 тыс. чел.: киргизы, узбеки, таджики и белорусы. Общее число их городских жителей составляет 805 тыс. чел. Белорусы исторически расселялись в городской местности совместно с русскими. Титульные этносы Центральной Азии включились в урбанизационные процессы позже. Активная миграция в 2000-х и 2010-х годах, прежде всего в столичные города, города-миллионеры привела к значительному росту их городского населения [6; 9]. В результате уровень урбанизированности этих этносов достиг 78% и выше.

Два этноса с численностью горожан от 50 до 100 тыс. чел. – евреи и грузины, исторически расселены в городской местности, имеют высокие показатели урбанизированности в России: грузины (78%) евреи (95%). Общая численность горожан среди них составляет 167,2 тыс. чел.

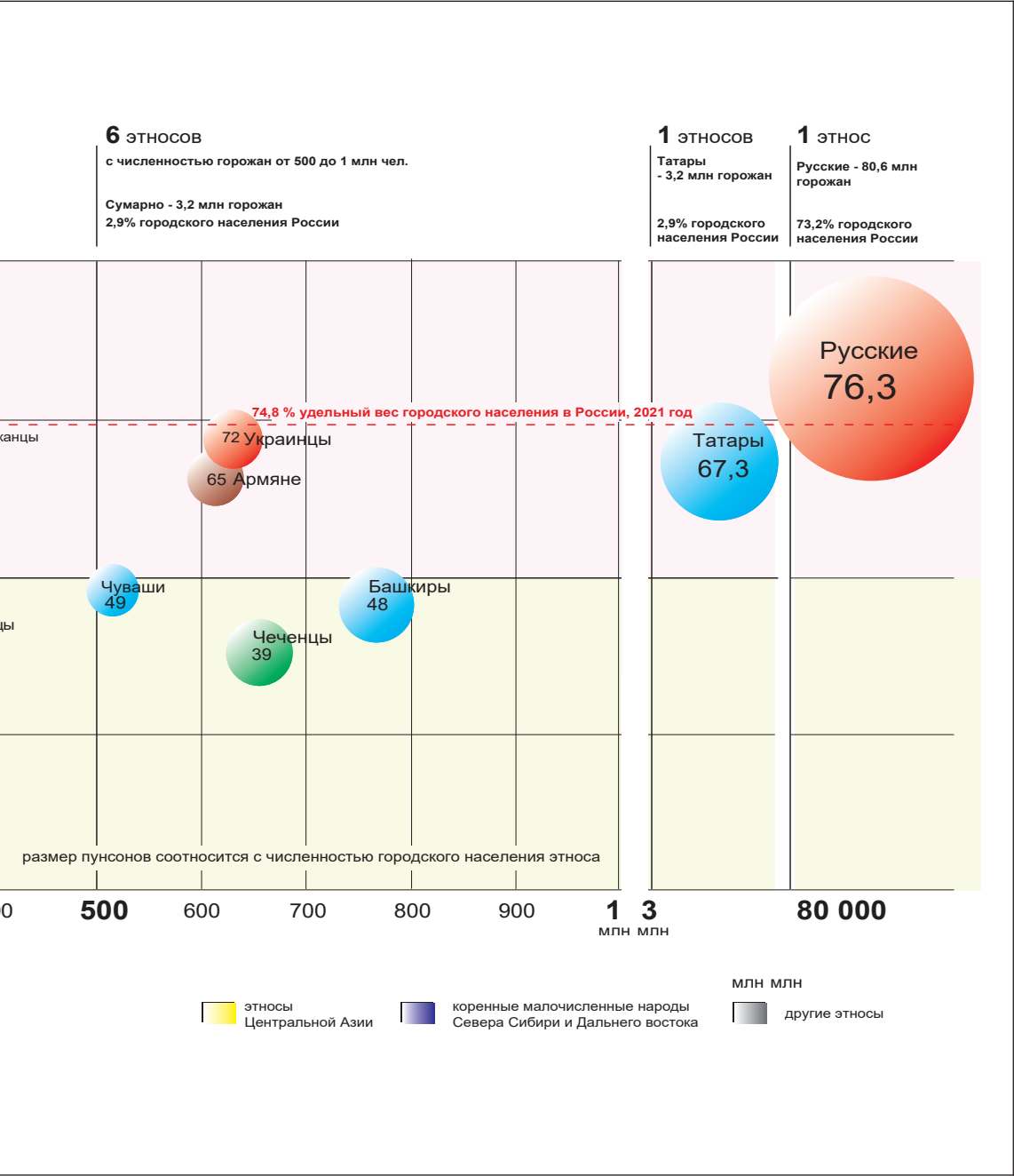


Таблица 1. ГРУППИРОВКА ЭТНОСОВ РОССИИ ПО УРОВНЮ
УРБАНИЗИРОВАННОСТИ, 2021 г.
Table 1. Classification of ethnic groups in Russia by urbanization level,
2021

Группа	Уровень урбанизи- рованности, %	Количество этносов	Численность горожан, млн чел.
Наиболее урбанизи- рованные	более 75	55	81,7
Умеренно урбанизированные	от 50 до 75	43	6,6
Менее урбанизи- рованные	от 25 до 50	61	4,4
С низким уровнем урбанизи- рованности	менее 25	35	0,1
Не указали национальность	—	—	15,4

Источник: составлено авторами по данным [3].
Source: compiled by the authors according to data [3].

Еще 48 этносов с численностью менее 50 тыс. чел. включают значимое число этносов, для которых Россия не является традици-онным местом проживания, такие как: индийцы, вьетнамцы, арабы, афганцы, китайцы, сербы, поляки, болгары, персы и др., так и ма-лочисленные народы России, например поморы, мишары, кереки. Суммарно они насчитывают 107 тыс. чел.

Обращает на себя внимание тот фактор, что этнос-группы с численностью горожан более 100 тыс. чел, в значительной степени имеют рассеянные ареалы расселения в городской местности, тог-да как у остальных ареалы расселения в основном локализованные.

Группу умеренно урбанизированных составляют 43 этноса общей численностью 6,6 млн горожан.

Лидеры группы по числу городских жителей – татары, их 3,2 млн чел., что в структуре городского населения соответствует 2,9%. Их уровень урбанизированности составляет 67,3%.

Два этноса, украинцы и армяне, имеют численность горожан от 500 тыс. до 1 млн чел., с уровнем урбанизированности 72% и 65% соответственно. Их суммарная численность городского населения составляет 1,2 млн чел.

Восемь этносов (азербайджанцы, осетины, ингуши, лезгины, мордва, тувинцы, лакцы, немцы) насчитывают в городской местности от 100 до 500 тыс. чел. В сумме число их горожан составило 1,8 млн чел.

Калмыки, молдаване и корейцы представляют собой три этноса с численностью горожан от 50 до 100 тыс. чел., суммарно составляя 209 тыс. чел.

Остальные 29 этносов, включая коренные малочисленные народы Севера, Сибири и Дальнего Востока (шорцы, манси, вепсы, нивхи, алюторцы), прибалтийские народы (литовцы, латыши, эстонцы), а также туркмены, карелы и др., имеют менее 50 тысяч горожан каждый. Суммарно эти 29 этносов насчитывают 128 тыс. горожан.

Характерно, что этносы с рассеянными ареалами расселения (украинцы, молдаване, корейцы, татары, немцы, армяне, азербайджанцы) демонстрируют более высокие показатели урбанизированности (от 65%), чем этносы с компактным расселением (лакцы, ингуши, лезгины, осетины, мордва, тувинцы, калмыки, манси, карелы).

Группу менее урбанизированных составляет 61 этнос.

Три крупнейших этноса этой группы – башкиры (47,5% горожан), чувашы (49%) и чеченцы (38,7%) – имеют от 500 тыс. до 1 млн горожан каждый, суммарно – 1,9 млн.

Девять этносов (аварцы, кумыки, казахи, кабардинцы, даргинцы, буряты, якуты, марийцы, удмурты) имеют численность от 100 до 500 тыс. горожан каждый. Их суммарное городское население составляет 2,1 млн. чел.

Шесть этносов (карачаевцы, табасараны, цыгане, коми, балкарцы, адыгейцы) имеют численность горожан от 50 до 100 тыс. чел. каждый, что в сумме составляет 390 тыс. чел.

Еще 43 этноса – с численностью менее 50 тыс. горожан. Среди этого перечня 20 – коренные малочисленные народы Севера, Сибири и Дальнего Востока, например, ханты, эвенки, эвены, чукчи, коряки. Также к этой группе этносов относятся черкесы, ногайцы, греки, хакасы, рутульцы. В сумме число их горожан – 317 тыс. чел.

Низкий уровень урбанизированности имеют 35 этносов. Среди них только крымские татары насчитывают 63,5 тыс. городских жителей. Остальные этносы имеют численность горожан менее 50 тыс. чел., суммарно их 52,3 тыс. горожан. Среди них 13 коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока (ненцы, нанайцы, долганы, тубалары, селькупы и др.)

Отметим, что группу с несостоявшимся урбанизационным переходом формируют этносы, имеющие преимущественно компактные ареалы расселения (за исключением цыган и казахов). Среди них значительная часть титульных этносов Поволжья (башкиры, чуваша, марийцы), Северного Кавказа (например, чеченцы, аварцы, даргинцы, кабардинцы, черкесы) а также коренные малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока.

Важно отметить, что у этносов, имеющих компактные ареалы расселения, в независимости от уровня урбанизированности, урбанизация происходит за счет внутрирегиональных урбанизационных процессов своих национально-территориальных образований, в частности городов, региональных центров. Так башкиры-горожане локализованы в границах Башкортостана – 75,8 %, в том числе в Уфе сконцентрированы 36 % от общего числа их горожан в России. Чеченцы-горожане сконцентрированы в Чеченской Республики – 85,7 % в том числе в Грозном – 48,4 %. Чуваша-горожане локализованы в границах Чувашской Республики – 64,7 %, а в Чебоксарах – 47,5 %. В Республике Дагестан локализовано 91,6 % аварцев-горожан (в Махачкале – 56,2 %), 87 % даргинцев-горожан, 86,4 % кумыков-горожан, 93,2 % лакцев-горожан, 79,9 % лезгин-

Таблица 2. КОНЦЕНТРАЦИЯ ГОРОДСКОГО НАСЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЭТНОСОВ В РЕГИОНАХ И СТОЛИЦАХ РОССИИ, 2021 г.
Table 2. Concentration of urban population of ethnic groups in regions and capitals of Russia, 2021

Этнос	Численность городского населения этноса	Доля горожан, локализованных в «своей» республике (% от общего числа горожан этноса в России)	Доля горожан, сконцентрированных в республиканском центре (% от общего числа горожан этноса в России)
Башкиры	763 201	75,8 (Республика Башкортостан)	29,9 (Уфа)
Чеченцы	648 041	85,7 (Чеченская Республика)	48,4 (Грозный)
Чуваши	522 928	64,7 (Чувашская Республика)	47,5 (Чебоксары)
Аварцы	384 620	91,6 (Республика Дагестан)	49,4 (Махачкала)
Осетины	303 355	88,8 (Республика Северная Осетия – Алания)	62,8 (Владикавказ)
Ингуши	276 805	94,0 (Республика Ингушетия)	48 (Магас/Назрань)
Лезгины	269 619	79,9 (Республика Дагестан)	38,3 (Махачкала)
Кумыки	267 049	86,4 (Республика Дагестан)	52,8 (Махачкала)
Мордва	248 343	60,3 (Республика Мордовия)	34,8 (Саранск)
Кабардинцы	233 290	94,0 (Кабардино-Балкарская Республика)	51,9 (Нальчик)
Даргинцы	228 898	87,0 (Республика Дагестан)	50,2 (Махачкала)
Буряты	218 361	69,2 (Республика Бурятия)	61,4 (Улан-Удэ)
Якуты	199 251	96,8 (Республика Якутия)	68,4 (Якутск)
Марийцы	186 642	57,7 (Республика Марий Эл)	29,3 (Йошкар-Ола)
Удмурты	133 977	68,7 (Удмуртская Республика)	43 (Ижевск)
Лакцы	124 020	93,2 (Республика Дагестан)	80 (Махачкала)

Источник: составлено авторами по данным [3].
Source: compiled by the authors according to data [3].

горожан. Ингуши-горожане локализованы в границах Ингушетии – 94 %; кабардинцы-горожане – в Кабардино-Балкарской Республике – 94 %; осетины – в Республике Северная Осетия – Алания – 88,8 %; буряты – в Республике Бурятия – 69,2 %; удмурты – в Удмуртской Республике – 68,7 %, якуты – в Республике Саха (Якутия) – 96,8 % [5].

Стоит отметить, что в постсоветский период (с 1989 по 2021 г.) **у этносов отмечаются разные темпы изменения уровня урбанизированности.** Стабильный показатель демонстрируют русские, азербайджанцы, кабардинцы, ненцы, чувашаи, мордва, башкиры, карелы. Заметно вырос удельный вес горожан (более чем на 10 %) среди тувинцев, чукчей, эскимосов, якут, манси, коряков, ингушей, ногайцев, агул, чеченцев, лезгин. Рост от 5 до 10 % отмечается среди эвенов, алтайцев, лакцев, хант, саами, даргинцев, карачаевцев, эвенков, вепсов, черкесов, аварцев, бурят. У всех перечисленных этносов рост числа горожан обеспечивался за счет изначально низкого уровня урбанизированности. Снижение уровня урбанизированности зафиксировано у греков, балкарцев, нанайцев, корейцев, удмуртов, удэгейцев.

Заключение

Проведенное исследование показало, что к началу 2020-х годов в России сложилась устойчивая дифференциация этносов по уровню урбанизированности, во многом унаследованная от советского периода, но модифицированная постсоветскими миграционными и внутрироссийскими социально-экономическими процессами. Наиболее урбанизированными являются русские, этносы Центральной Азии, а также евреи, грузины и малочисленные этносы, для которых Россия не является традиционным местом расселения (индусы, китайцы, сербы, афганцы, вьетнамцы и др.).

Умеренную урбанизированность демонстрируют татары, армяне, азербайджанцы и ряд народов Северного Кавказа (лакцы, лезгины, осетины, ингуши). Наименее урбанизированными остаются многие титульные народы республик Поволжья, Северного Кавказа и особенно коренные малочисленные народы Севера, Сибири и

Дальнего Востока. Для последних характерна сохранение компактных ареалов сельского расселения и низкая вовлеченность в урбанизацию даже в пределах собственных национально-территориальных образований [10; 11]. Важно отметить, что низкий уровень урбанизированности отдельных этносов связан с неразвитостью городской инфраструктуры в местах их компактного расселения [12].

Этносы с рассеянным ареалом демонстрируют системно более высокий уровень урбанизированности. Дисперсность расселения создаёт условия для ускоренной аккультурации, вертикальной мобильности и концентрации в крупных городских агломерациях вне пределов «титульных» регионов.

Этносы с компактным ареалом, как правило, имеют более низкие показатели доли городского населения. Компактность коррелирует с сохранением традиционного уклада, аграрной специализацией, более поздним и менее интенсивным вовлечением в индустриально-городскую среду, а также с этнотерриториальной автономией (республики, округа), где урбанизация часто ниже общероссийской.

Не столько этническая принадлежность, сколько *конфигурация ареала расселения* (дисперсность или компактность) выступает предиктором уровня включённости этноса в урбанизационные процессы. Рассеянные ареалы генерируют высокую урбанизационную активность, компактные – консервируют сельский тип расселения.

При прогнозировании пространственного развития и межрегиональной миграции необходимо учитывать, что для этносов с компактным ареалом меры урбанизации должны сопровождаться сохранением культурного ландшафта и сопровождаться институциональной поддержкой городской адаптации.

Полученные результаты могут служить основой для дальнейшего углубленного анализа этнических аспектов расселения, а также для разработки региональной социально-экономической политики с учетом этнодемографической специфики.

Список источников

1. Зайончковская Ж. А. Миграция и этническая структура населения России // Население и общество. 2017. № 2 (45). С. 1–8.

2. Попов Р. А. Урбанизованность регионов России во второй половине XX века // Россия и ее регионы в XX веке: территория – расселение – миграции. Под ред. О. Глезер и П. Поляна. М.: ОГИ, 2005. С. 215–244.
3. Федеральная служба государственной статистики. Итоги Всероссийской переписи населения 2020 года. Т. 5. Национальный состав и владение языками. М.: Росстат, 2022. 634 с.
4. Национальный состав населения СССР. По данным Всесоюзной переписи населения 1989 года. М., 1990. 344 с.
5. Этносы в пространстве современной России (муниципальное измерение) / Дружинин А. Г., Кузнецова О. В., Потапенко В. В., Вольхин Д. А.; под ред. А. Г. Дружинина. – М.: Т-во научных изданий КМК, 2025. 120 с.
6. Миграционный атлас Российской Федерации / С. В. Рязанцев, В. С. Белозеров, Н.А. Щитова [и др.]; ФНИСЦ РАН. М.: ИТД «Перспектива», 2022. 232 с.
7. Белозеров В. С., Черкасов А. А. ГИС Мониторинг этнических процессов в России // Наука. Инновации. Технологии. 2013. № 1. С. 157–161.
8. Черкасов А. А. Этнические аспекты урбанизации в России. Ставрополь: ФОК-Юг, 2016. 240 с.
9. Рязанцев С. В., Брагин А. Д. Влияние иммиграции на этно-демографические процессы в России // Научное обозрение. Серия 2: Гуманитарные науки. 2021. № 6. С. 20–28. <https://doi.org/10.26653/2076-4685-2021-6-02>
10. Николаев В. В., Октябрьская И. В. Урбанизация коренных народов Сибири и Дальнего Востока (XX – начало XXI века) // Археология, этнография и антропология Евразии. 2021. Т. 49. № 4. С. 127–139. <https://doi.org/10.17746/1563-0102.2021.49.4.127-139>
11. Макарова Л. В., Ткаченко А. А. Урбанизация и этнические процессы в регионах Севера, Сибири и Дальнего Востока // Региональные исследования. 2023. № 4 (78). С. 45–58.
12. Ахметова Г. Ф. Тенденции урбанизационных процессов в национальных республиках Урало-Поволжья // Народонаселение. 2025. Т. 28. № 2. С. 72–86. <https://doi.org/10.15507/2076-2577.017.2025.04.496-512>

References

1. Zayonchkovskaya ZhA. Migration and Ethnic Structure of Russia's Population. *Population and Society*. 2017;2(45):1-8. (in Russ.).
2. Popov RA. Urbanization of Russian Regions in the Second Half of the 20th Century. *Russia and Its Regions in the 20th Century: Territory – Settlement – Migrations*. Eds. O. Glezer and P. Polyan. Moscow: OGI; 2005. P. 215-244. (in Russ.).
3. Federal State Statistics Service. Results of the 2020 All-Russian Population Census. Vol. 5. National Composition and Language Proficiency. Moscow: Rosstat; 2022. 634 p. (in Russ.).
4. National Composition of the USSR Population. According to the 1989 All-Union Population Census. Moscow, 1990. 344 p. (in Russ.).
5. Belozеров V.S., Cherkasov A.A. GIS Monitoring of Ethnic Processes in Russia. *Science. Innovations. Technologies*. 2013;(1):157-161. (in Russ.).
6. Cherkasov A.A. Ethnic Aspects of Urbanization in Russia. Stavropol: FOC-South; 2016. 240 p. (in Russ.).
7. Ryazantsev SV, Belozеров VS, Shchitova NA. [et al.]. Migration Atlas of the Russian Federation. FNISTC RAS. Moscow: ITD «PERSPEKTIVA»; 2022. 232 p. <https://doi.org/10.51285/978-5-905790-56-0>
8. Ryazantsev SV, Bragin AD. The Impact of Immigration on Ethno-Demographic Processes in Russia. *Scientific Review. Series 2: Humanities*. 2021;(6):20-28. (in Russ.). <https://doi.org/10.26653/2076-4685-2021-6-02>
9. Druzhinin AG, Kuznetsova OV, Potapenko VV, Volkhin DA. Ethnic Groups in the Space of Modern Russia (Municipal Dimension). Moscow: KMK Scientific Press, 2025. 120 p. (in Russ.).
10. Nikolaev VV, Oktyabrskaya IV. Urbanization of Indigenous Peoples of Siberia and the Far East (20th – Early 21st Centuries). *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*. 2021;49(4):127-139. (in Russ.). <https://doi.org/10.17746/1563-0102.2021.49.4.127-139>
11. Makarova LV, Tkachenko AA. Urbanization and Ethnic Processes in the Regions of the North, Siberia and the Far East. *Regional Studies*. 2023;4(78):45-58. (in Russ.).
12. Akhmetova GF. Trends in Urbanization Processes in the National Republics of the Ural-Volga Region. *Population*.

2025;28(2):72-86. (in Russ.). <https://doi.org/10.15507/2076-2577.017.2025.04.496-512>

Информация об авторах

Александр Александрович Черкасов – кандидат географических наук, доцент департамента географии и геоинформатики факультета международных отношений Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 57192379694.

Василий Васильевич Чихичин – кандидат географических наук, доцент департамента географии и геоинформатики факультета международных отношений Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 57192369814.

Вклад авторов

Все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Information about the authors

Alexander A. Cherkasov – Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor of the Department of Geography and Geoinformatics, Faculty of International Relations, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 57192379694.

Vasiliy V. Chikhichin – Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor of the Department of Geography and Geoinformatics, Faculty of International Relations, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 57192369814.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.



Научная статья

УДК 551.51

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.4>

СОСТОЯНИЕ И ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЗИКИ ОБЛАКОВ И АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Борис Азреталиевич Ашабоков¹,
Игорь Сергеевич Афанасьев^{2*},
Зухура Сайдуллаховна Гаева³,
Виталий Александрович Шаповалов⁴

^{1,2,3,4} Высокогорный геофизический институт (д. 2, пр. Ленина, Нальчик, 360030, Российская Федерация)

¹ Кабардино-Балкарский научный центр РАН (д. 37А, ул. И. Арманд, Нальчик, 360000, Российская Федерация)

⁴ Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х. М. Бербекова (д. 173, ул. Чернышевского, Нальчик, 360004, Российская Федерация)

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

² afanasevigor278@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4490-6659>

³ gzs@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-4305-0809>

⁴ vet555_83@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9701-6820>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Объектом исследования является состояние физики конвективных облаков и активных воздействий. Отмечено, что темпы развития данного научного направления существенно снизились с конца 80-х годов. Традиционные методы анализа, фокусирующиеся на состоянии исследований «элементарных» процессов в облаках, не позволили выявить причины замедления его развития. По результатам анализа состояния физики конвективных облаков и активных воздействий с точки зрения этапов развития систем удалось установить эти причины. Оказалось, что они заключаются в том, что настоящий период времени является переходным для данного научного направления. Он состоит в переходе от изучения «элементарных» процессов к изучению облаков как целостных систем. Цель работы – анализ основных направлений развития физики конвективных облаков и активных воздействий, формулировка задач этих направлений, анализ методологий моделирования роли системных свойств в формировании облаков. Обсуждаются некоторые результаты исследований роли таких системных свойств, как взаимодействие облаков с окружающей атмосферой и взаимодействие процессов в облаках в формировании их структуры. Рассмотрены про-

веденные ранее исследования, основанные на использовании трехмерной нестационарной модели и двумерной модели микрофизических процессов в градовых облаках с заданной термогидродинамикой. Установлено, что процессы облакообразования наиболее чувствительно к вариациям скорости ветра в нижних слоях тропосферы. Выявлено, что рост града происходит в температурном интервале $-10^{\circ}\text{C} \dots -25^{\circ}\text{C}$, а процессы осадкообразования носят циклический характер. Предложен алгоритм разработки метода активного воздействия на градовые облака с учетом их синергетических свойств.

Ключевые слова: физика облаков, численное моделирование, микрофизика облаков, системные свойства, бифуркация, активные воздействия.

Для цитирования: Состояние и основные направления исследований физики облаков и активных воздействий / Б. А. Ашабоков, И. С. Афанасьев, З.С. Гаева, и др. // Наука. Инновации. Технологии. 2026. № 2. С. 71–90. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.4>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 12.04.2026;
одобрена после рецензирования 15.06.2026;
принята к публикации 25.06.2026.

**1.6.18. Atmospheric and climate sciences
(physical and mathematical sciences)**
Research article

**Current state and main research trends in cloud
physics and active effects**

Boris A. Ashabokov¹
Igor S. Afanasyev^{2*}
Zukhura S. Gaeva³
Vitaly A. Shapovalov⁴

^{1,2,3,4} High Mountain Geophysical Institute (2, Lenin Ave., Nalchik, 360030, Russian Federation)

¹ Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (37A. Armand St., Nalchik, 360000, Russian Federation)

⁴ Kabardino-Balkarian State University named after Kh. M. Berbekov (173, Chernyshevskogo St., Nalchik, 360004, Russian Federation)

¹ afanasevigor278@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-4490-6659>

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

³ gzs@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-4305-0809>

⁴ vet555_83@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9701-6820>

* Corresponding author

Abstract.

The subject of the study is the current state of the physics of convective clouds and weather modification. It is noted that the pace of development in this scientific field has significantly declined since the late 1980s. Traditional analytical approaches, focusing on the state of research into "elementary" cloud processes, failed to identify the reasons for this slowdown. By analyzing the state of convective cloud physics and weather modification from the perspective of system development stages, these reasons have been established. It has been found that the present period represents a transitional phase for this scientific field, characterized by a shift from studying "elementary" processes toward investigating clouds as integrated systems. The study analyzes the main trends in the physics of convective clouds and weather modification, specifies the objectives of these directions, and examines methodologies for modeling the role of systemic properties in cloud formation. Some research results concerning the role of such systemic properties as cloud-environment interaction and internal cloud process interactions in shaping cloud structure are discussed. Previously conducted studies based on a three-dimensional non-stationary model and a two-dimensional microphysical model of hail clouds with prescribed thermohydrodynamics are reviewed. It has been established that cloud formation processes are most sensitive to wind speed variations in the lower troposphere. It has been revealed that hail growth occurs within the temperature range of -10°C to -25°C , and precipitation processes exhibit a cyclic character. An algorithm for developing weather modification techniques for hail clouds, taking into account their synergistic properties, is proposed.

Keywords:

cloud physics, numerical modeling, cloud microphysics, systemic properties, bifurcation, weather modification.

For citation:

Ashabokov BA, Afanasyev IS, Gaeva ZS, Shapovalov VA. Current state and main research trends in cloud physics and active effects. *Science. Innovations. Technologies.* 2026;(2):71–90. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.4>

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

The article was submitted 12.04.2025;
approved after reviewing 15.06.2025;
accepted for publication 25.06.2025.

Введение

Наиболее продуктивным периодом для физики облаков и активных воздействий стала вторая половина XX века. В сжатые сроки сформировалась методологическая база, позволяющая изучать механизмы образования облаков и закономерности формирования их макро- и микроструктуры [1]. Накоплен массив данных натурных наблюдений за эволюцией конвективных облаков как в естественных условиях, так и при активном воздействии. Создан класс численных моделей, включая трехмерные нестационарные с подробным учетом микрофизики [1–5].

Однако достигнутые успехи не исключают неоднозначности в оценке текущей ситуации. Начиная с конца 1980-х годов, стало заметно существенное замедление темпов развития физики облаков и активных воздействий. Анализ состояния данной области за разные временные отрезки (1980-е годы, начало 1990-х, 2010 г.) подтверждает отсутствие качественных сдвигов примерно с середины 1980-х годов. Принципиально новые результаты, способных углубить существующие представления, за указанный период не были получены.

Неоднозначная ситуация сохраняется и в сфере активных воздействий на конвективную облачность. Реализуемые подходы базируются либо на субъективных концепциях авторов относительно механизмов осадкообразования, либо на моделировании, не учитывающем синергетические свойства облаков как нелинейных динамических систем [6–7]. В сложившихся условиях подобные методы не обладают должной научной обоснованностью и надежностью. Это актуализирует задачу создания новых методологий и строго обоснованных подходов к активным воздействиям.

Преодоление негативных тенденций в развитии физики облаков требует выявления причин их возникновения. Предшествующие исследования [1–3, 8], посвященные анализу состояния данного научного направления, фокусировались преимущественно на степени изученности микрофизических процессов в контексте их формализации с целью включения их в численные модели облаков. В работе [3] анализ выполнен с позиций этапов, методологий и инструментов изучения сложных систем.

Текущий этап правомерно считать переходным: акцент смещается с исследования «элементарных» процессов на рассмотрение облаков как сложных динамических систем. Ключевой целью выступает выявление закономерностей формирования макро- и микроструктуры облаков. Дальнейший прогресс физики облаков будет обусловлен постановкой и решением качественно новых задач посредством соответствующих моделей и методологий. Развитие технологий активных воздействий требует разработки методов с учетом синергетических свойств облаков.

В статье приводятся итоги анализа текущего состояния физики облаков и активных воздействий, сформулированы приоритетные направления ее развития и соответствующие им задачи. Обсуждаются результаты моделирования влияния системных свойств на структуру конвективных облаков, формулируются задачи, возникающие на пути создания метода активного воздействия на градовые процессы.

Материалы и методы исследований

Методология исследования сложных систем вне зависимости от их природы базируется на двух фундаментальных подходах — декомпозиции и агрегировании [9]. Применительно к конвективным облакам на этапе декомпозиции из общей системы были выделены «элементарные» микрофизические процессы, такие как процессы образования и роста капель и кристаллов, а также их электризации. Изучением этих процессов методами лабораторного моделирования занималась физика облаков во второй половине прошлого столетия. Можно отметить работы [10–11], посвященные данной проблеме. К настоящему времени их состояние можно охарактеризовать таким образом, что многие из них, преимущественно процессы с участием капель, удалось исследовать и формализовать. Что касается процессов образования и роста кристаллов, а также электризации частиц в облаках, то исследования в направлениях изучения и формализации этих процессов продолжаются.

Важно отметить, что агрегирование «элементарных» процессов в облаках возможно в рамках численных моделей, что делает численное моделирование основным методом исследований.

В краткой форме остановимся на методологиях изучения роли системных в процессах облакообразования.

1. *Исследование влияния взаимодействия облаков с окружающей атмосферой на процессы облакообразования.*

В работе [12] применялась методика, основанная на сопоставлении параметров реального и модельных облаков, сформированных при различных вариациях поля ветра в атмосфере. Вычислительные эксперименты базировались на трехмерной нестационарной модели. Исходные параметры задавались на основе данных аэрологического зондирования (метеостанция аэропорта М/Воды). Вычисления выполнялись для двух серий модельных облаков.

2. *Исследование влияния взаимодействия процессов в облаках на формирование структуры облака.*

Проведение исследований в данном направлении сопряжено со значительными методическими трудностями, главная из которых – необходимость разработки специализированных моделей облачной динамики. Прямая оценка вклада отдельных процессов в формирование макро- и микроструктуры затруднена их высокой взаимосвязью [3, 13]. Поэтому в работе реализован подход, основанный на анализе косвенных индикаторов их взаимодействия. Стоит отметить, что деформация термодинамических полей внутри облака относительно фоновых значений является интегральным следствием совместного действия динамических, термодинамических и микрофизических механизмов. Таким образом, изучение влияния данной деформации на формирование микроструктуры облака позволяет косвенно оценить роль взаимодействия процессов в осадкообразовании.

В работе [3] приводятся результаты моделирования влияния деформации температурного поля в облаке на процессы осадкообразования, использовалась двумерная модель микрофизики градовых облаков с заданной термогидродинамикой [3–4, 11]. Детальное описание «элементарных» процессов, а также методики и итоги моделирования приведены в источниках [2–3, 5].

Результаты исследований и их обсуждение

1. Анализ состояния физики конвективных облаков.

Раздел посвящен анализу текущего этапа развития физики облаков, который характеризуется как переходной. Наблюдается фундаментальный сдвиг парадигмы: от детального изучения изолированных «элементарных» процессов к комплексному исследованию облаков как целостных систем с целью выявления закономерностей формирования их макро- и микроструктуры. Сформулированы приоритетные направления исследований нового этапа, определены ключевые задачи и обсуждаются методологические подходы к их решению.

Анализ эволюции методов исследования облаков как сложных систем позволяет выделить три последовательных этапа:

- 1) декомпозиция системы и изучение «элементарных» процессов в облаках;
- 2) агрегирование «элементарных» процессов;
- 3) изучение облаков как целостных объектов для установления закономерностей формирования их макро- и микроструктуры.

Рассмотрим состояние первого этапа. Конвективные облака представляют собой сложную иерархическую систему, элементами второго иерархического уровня которой являются блоки процессов термогидродинамики, микрофизических и электрических процессов. Стоит отметить, что изучение термогидродинамики опиралось на фундаментальные законы термодинамики и гидродинамики, сформулированные еще в XIX веке. Основное внимание на этапе уделялось изучению микрофизических процессов (нуклеация, рост частиц) и механизмов электризации облачных частиц. Изучение этих процессов было основано на лабораторном моделировании.

Анализ результатов этого направления показывает, что, если процессы с участием капель изучены детально и успешно формализованы, то механизмы взаимодействия ледяных кристаллов и атмосферных аэрозолей требуют дальнейшего углубленного исследования. Существенные трудности возникают при формализации

процессов взаимодействия частиц реагентов с облачной средой, что препятствует моделированию активного воздействия. Ситуация с электризацией облачных частиц также остается проблемной: количество изученных и формализованных механизмов ограничено, что не позволяет в полной мере описать электрическую структуру облаков.

Второй этап – агрегирование «элементарных» процессов – развивался параллельно с первым. Как было отмечено, решение данной задачи возможно в рамках численных моделей облаков. К настоящему моменту разработаны модели, на основе которых возможно исследование закономерностей формирования макро- и микроструктуры облаков с учетом отмеченных процессов [2–5].

Таким образом, настоящий период является переходным для физики облаков – происходит переход от этапа изучения «элементарных» процессов к этапу изучения закономерностей формирования их макро- и микроструктуры.

Несмотря на это, завершение исследований недостаточно изученных «элементарных» процессов (активация аэрозолей, рост кристаллов, электризация) остается актуальной задачей. Особенно критичным является изучение взаимодействия реагентов со средой, так как разработка эффективных методов активного воздействия невозможна без детального знания этих механизмов и их корректного учета в численных моделях.

Как отмечалось ранее, главная цель нового этапа развития физики облаков – выявить закономерности формирования их макро- и микроструктуры. Для этого необходимо определить факторы, являющиеся структурообразующими. К ним относят, прежде всего, системные свойства облаков: их взаимодействие с атмосферой и взаимодействие «элементарных» процессов в облаках [3, 12, 13].

Первый фактор связан с иерархичностью системы «атмосфера–облако». Атмосфера является вышестоящей системой по отношению к облаку: именно её состояние диктует условия облакообразования, задавая направления развития и требования к параметрам облака. Таким образом, взаимодействие с окружающей средой выступает фундаментальным структурообразующим элементом. При этом механизмы такого влияния многообразны, и некоторые из них

(например, причины формирования одноячейковых или многоячейковых структур в схожих условиях) до сих пор не имеют полного качественного объяснения.

Также стоит отметить, что взаимодействие физических процессов в облаках приводит к возникновению эмерджентных свойств – качественно новых характеристик, которыми не обладает ни один из отдельных процессов в изоляции [3].

Исходя из этого, формулируются два новых направления исследований:

- исследование роли взаимодействия облаков с окружающей атмосферой в формировании их макро- и микроструктуры;
- исследование роли взаимодействия процессов в облаках в формировании их макро- и микроструктуры.

Задачи, методология и методы решения этих направлений будут рассмотрены далее. В качестве примера приведем результаты численного моделирования, демонстрирующие роль системных свойств в процессах облакообразования.

2. *Роль взаимодействия облаков с окружающей атмосферой.*

Анализ результатов численных экспериментов позволяет оценить влияние конфигурации ветрового поля на динамику облакообразования, что представляет собой один из доминирующих механизмов связи облачной системы с внешней средой. На рисунке 1 приведено сравнение двух сценариев: идеализированной модельной структуры ветра (слева) и реальной картины, восстановленной по данным наблюдений (справа).

Реальная структура поля ветра и входные данные модели были получены по результатам аэрологического зондирования атмосферы (аэропорт Минеральные Воды) [12]. Как видно на рисунке, реальная структура поля ветра носит более сложный характер: направление ветра меняется по высоте, в то время как в модельной структуре направление ветра едино на всех высотах. В табли-

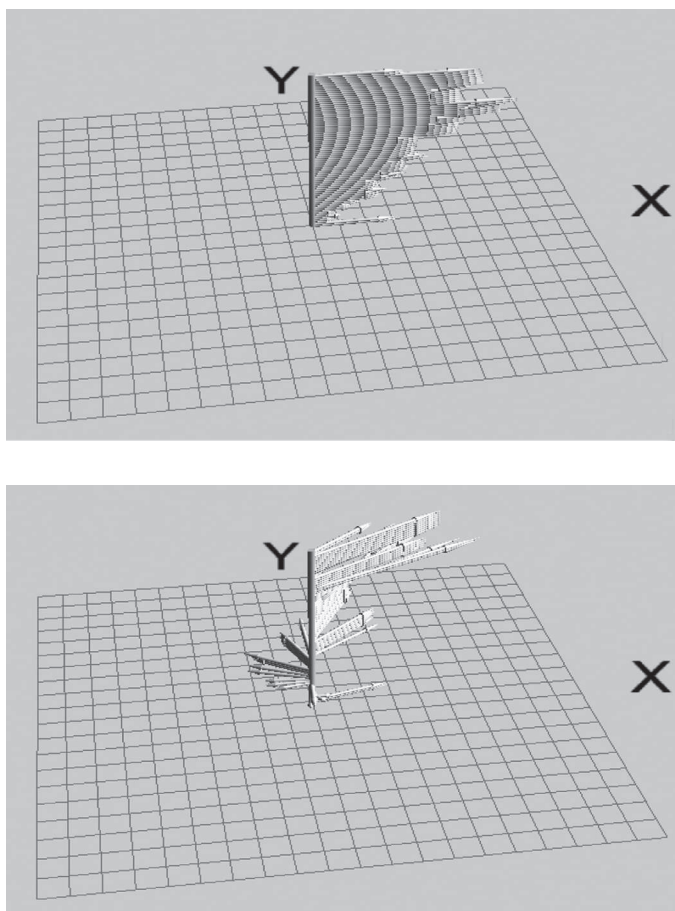


Рис. 1.

Модельная (слева) и реальная (справа) структура поля ветра в атмосфере.

Fig. 1. Model (left) and real (right) structure of the wind field in the atmosphere.

це 1 приведены максимальные значения параметров исходного и модельного облаков. В таблице использованы обозначения: $Q_{\max}$, $W_{\max}$, $Z_{\max}$ – максимальные значения удельной влажности, вертикальной составляющей скорости воздушных потоков и отражаемости, $HQ_{\max}$, $HW_{\max}$ и $HZ_{\max}$ -высоты над поверхностью земли, на которых расположены максимальные значения отмеченных параметров.

Можно заметить, что структуры и параметры исходного и модельного облаков заметно различаются: процессы облакообразования носят более интенсивный характер в случае модельной структуры поля ветра в атмосфере, т.е. в случае, когда атмосфера меньше препятствует процессам облакообразования.

Таблица 1. МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАКОВ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ РЕАЛЬНОЙ И МОДЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЕ ПОЛЯ ВЕТРА В АТМОСФЕРЕ (02.06.2010 г.)
Table 1. Maximum values of some cloud parameters corresponding to the real and model structure of the wind field in the atmosphere (June 02,2010)

	Реальная структура поля ветра в атмосфере			Модельная структура поля ветра в атмосфере		
Время, мин	20	30	40	20	30	40
$Q_{\max}$, г/м ³	6,63	8,7	6,9	11,8	11,1	10,9
$HQ_{\max}$, км	4,75	5,25	4,5	7,0	6,75	6,5
$W_{\max}$, м/с	17,9	12,8	7,9	44,4	39,3	39,0
$HW_{\max}$, км	3,5	5,0	5,0	6,5	7,0	6,75
$Z_{\max}$, dBZ	37,6	64,7	64,3	60,0	62,8	66,6
$HZ_{\max}$, км	4,25	5,25	3,75	6,5	6,0	5,5

Были проведены численные эксперименты, направленные на изучение влияния вариаций скорости ветра при сохранении его направления. Первая серия расчетов предполагала варьирование скорости ветра на 5 % в каждом из высотных интервалов: [0–2 км], [2–4 км], [4–6 км], [6–8 км], [9–12 км]. Для второй серии величина вариации составляла 10 %. Таким образом, каждая серия включала 5 облаков, соответствующих указанным изменениям скорости ветра в заданных слоях атмосферы. Вычислительные эксперименты продемонстрировали повышенную чувствительность процессов облакообразования к изменениям скорости ветра в нижних слоях тропосферы. Вероятно, это обусловлено тем, что рост скорости ветра в приземных слоях интенсифицирует приток теплого и влажного воздуха, способствуя развитию более мощных облачных систем. Соответственно, реакция облака на возмущения скорости ветра ослабевает с увеличением высоты слоя вариации. Начиная с определенного уровня, облака практически не реагируют на изменения скорости ветра в тропосфере.

3. *Роль взаимодействия процессов в облаке в формировании его структуры.*

Непосредственная оценка роли взаимодействия отдельных процессов осложнена их сильной взаимозависимостью. В данном исследовании применен косвенный метод анализа, базирующийся на изучении роли деформации полей термодинамических параметров. Из работ, посвященных изучению деформации метеорологических элементов в облаках в натуральных условиях, можно отметить работу [13]. Однако возможности такого подхода к изучению роли данного фактора в облакообразовании существенно ограничены. Более эффективным для проведения исследований в этом направлении является математическое моделирование. Для этой цели была использована модель микрофизических процессов в градовых облаках, в которой термогидродинамика была задана. Поля параметров термогидродинамики были построены на основе эмпирической модели мощных градовых облаков [14].

Численные эксперименты выполнялись при варьировании величины отклонения температуры в облаке от фоновых значений

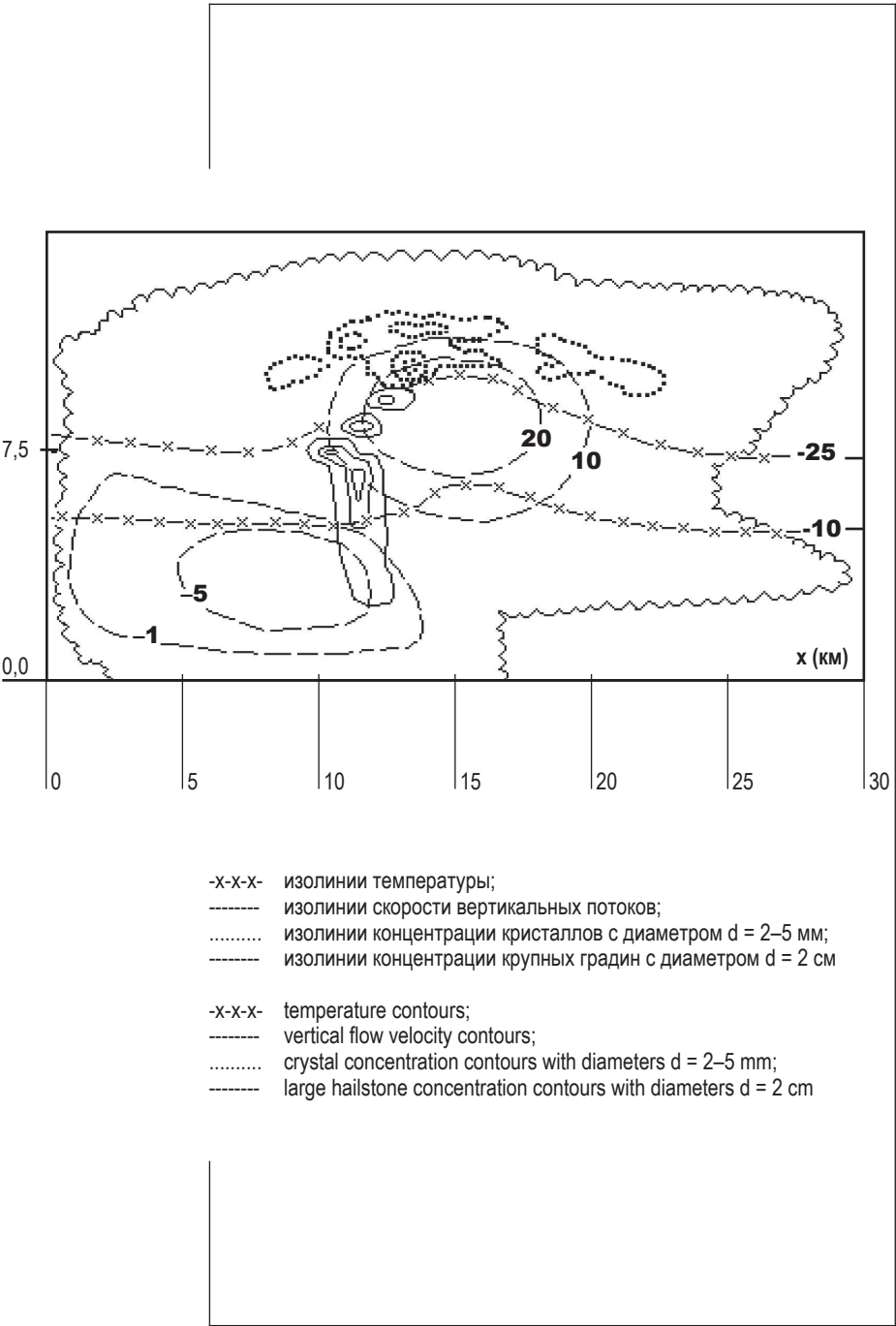


Рис. 2. Изолинии параметров облака на 24 минуте развития облака.
Fig. 2. Cloud parameter contours at 24 minutes of cloud development.

(ΔT), достигавшей максимума в 13°C . На рисунке 2 показаны изолинии параметров облака, соответствующие 24-й минуте эволюции при максимальном значении ΔT [3].

Анализ расчетных данных и изолиний параметров облака выявил следующие закономерности:

1. Для образования градин при отсутствии деформации поля температуры требуется экстремально высокая влажность в облаке (около 80 г/м^3). Под влиянием деформации поля температуры в облаке формируется протяжённая зона, в которой создаются термодинамические и микроструктурные условия, способствующие зарождению и интенсивному росту градин.
2. Ледяные кристаллы диаметром 2–5 мм формируются в слое между изотермами -10°C и -25°C . Эти кристаллы служат зародышами градин и удерживаются в указанном температурном слое за счёт восходящих потоков.
3. Одновременно происходит увеличение их концентрации за счет замерзания крупных капель, а также рост градин за счет захвата переохлажденных капель, поступающих в эту зону из нижней части облака восходящими потоками.
4. Формирование слоистой структуры градин обусловлено не столько многократными вертикальными перемещениями в зоне восходящих потоков, сколько изменением режима роста в процессе движения в указанном температурном интервале. Разделение облака на зоны зарождения и роста градин не соответствует физической реальности.
5. Замкнутые области, ограниченные изолиниями концентраций градин, указывают на циклический характер осадкообразования. Это согласуется с принципом колебательной эволюции сложных систем и подтверждает системную природу процесса.

Важно отметить, что полученные результаты моделирования (в частности, температурные интервалы) хорошо согласуются с данными изотопного анализа градин, полученными в ходе натурных исследований [10]. Модальные значения температуры зарождения града на крупных зародышах составляют от -20°C до -25°C , а на замерзших каплях примерно -10°C . Рост града также происходит в температурном интервале от -10°C до -25°C . Это подтверждает адекватность используемой методологии.

4. *Принципы разработки метода активного воздействия на основе системных свойств.*

Анализу проблемы разработки методов активного воздействия на конвективные облака посвящено достаточно много работ, из которых можно отметить, например, работу [15]. Но при этом не учитывалось, что при разработке таких методов облака необходимо рассматривать как системы. На основании результатов проведенного анализа современного состояния физики облаков и активных воздействий сформулированы основные задачи и принципы алгоритма разработки метода активного воздействия на градовые облака с учетом их синергетических свойств.

Ключевые задачи алгоритма, вытекающие из результатов исследования:

- анализ состояния облачной среды в различных областях облака и протекающих в них микрофизических процессов с целью определения области, условия в которой благоприятны для достижения целей активного воздействия;
- определение зоны бифуркации в облаке, в которой условия благоприятны для АВ с целью предотвращения образования крупных градин;
- определение минимальных размеров (горизонтальных и вертикальных) данной области, достаточных для предотвращения образования градин;
- определение способа исключения **многовариантности** развития облака после активного воздействия в зону бифуркации.

Переход к разработке методов активного воздействия на конвективные облака, учитывающих синергетические свойства облаков, позволяет повысить научную обоснованность и надежность методов активных воздействий. Выявленные закономерности (наличие зоны бифуркации и бифуркационных переходов в облаке) составляют фундамент для разработки нового физического принципа воздействия на градовые процессы кристаллизующим реагентом.

Заключение

В развитии физики облаков и активных воздействий в настоящее время наметился переход к новому этапу развития. Дальнейший прогресс в этой области науки будет связан с постановкой и решением качественно новых задач. Сформулированы приоритетные направления его развития. Отмечено, что и на наступающем этапе исследование недостаточно изученных процессов в облаках (в основном микрофизических и электрических) сохраняет высокую значимость. Новыми направлениями исследований выступают оценка влияния внешней среды и взаимодействия процессов в облаках на формирование их структуры.

Численные эксперименты показали, что процессы облакообразования в высокой степени чувствительны к изменениям структуры поля в нижней тропосфере. Установлено, что слоистость градин формируется за счет смены режимов роста в специфическом температурном диапазоне ($-10^{\circ}\text{C} \dots -25^{\circ}\text{C}$), а не только за счет вертикальных перемещений. Выявленная цикличность осадкообразования коррелирует с принципами эволюции нелинейных систем.

В сфере активных воздействий приоритет отдается методам, разработанным с учетом синергетических свойств облаков. Предложен алгоритм создания методов воздействия на градовые облака, базирующийся на учете этих свойств.

Список источников

1. Ашабоков Б. А., Калажоков Х. Х. Численное моделирование градовых облаков. М.: Гидрометеоиздат, 1992. 135 с.
2. Численное моделирование облаков / Е. Л. Коган, И. П. Мазин, Б. Н. Сергеев, В. И. Хворостьянов. М.: Гидрометеоиздат, 1984. 185 с.
3. Физика облаков и активных воздействий на них / Б. А. Ашабоков, Л. М. Федченко, А. В. Шаповалов, В. А. Шаповалов. Нальчик: Печатный двор, 2017. 240 с.
4. Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака / Веремей Н. Е., и др. // Труды Главной геофизической обсерватории. 2016. Вып. 282. С. 45–91.
5. Straka J. Cloud and Precipitation Microphysics: Principles and Parameterizations. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 408 p.
6. Руководство по организации и проведению противогордовых работ / М. Т. Абшаев, А. М. Абшаев, М. В. Барекова, А. М. Малкарова. Нальчик: Печатный двор, 2014. 508 с.
7. Колосков Б. П., Корнеев В. П., Щукин Г. Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. СПб.: Издательство РГГМУ, 2012. 342 с.
8. Мазин И. П., Шмистер С. М. Облака, строение и физика образования. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 279 с.
9. Методы анализа нелинейных динамических систем / М. Холоднюк, А. Клич, М. Кубичек, М. Марек. М.: Мир, 1991. 368 с.
10. Pruppacher H. R., Klett J. D. Microphysics of Clouds and Precipitation. D. Reidel Publishing Company, 1978. 714 p.
11. Хоргуани В. Г. Микрофизика зарождения и роста града. М.: Гидрометеоиздат, 1984. 186 с.
12. Численное моделирование влияния структуры поля ветра в атмосфере на макро- и микроструктурные характеристики конвективных облаков / Б. А. Ашабоков и др. // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58, № 6. С. 669–680.
13. Мазин И. П., Шмистер С. М. О деформации полей метеорологических элементов в зоне кучевого облака // Вопросы физики облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. С. 135–167.
14. Browning K. A., Foote G. B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. National Hail Research Experiment, 1975. Tech. Rep. № 75/1. 75 p.

15. Пастушков Р. С. Численное моделирование активных воздействий на конвективные облака: актуальные направления, нерешенные задачи, возникающие вопросы (по публикациям 2007–2010 гг.) // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик: Печатный двор, 2013. С. 16–25.

References

1. Ashabokov BA, Kalazhokov KhKh. Numerical modeling of hail clouds. Moscow: Gidrometeoizdat; 1992. 135 p. (In Russ.).
2. Kogan EL, Mazin IP, Sergeev BN, Khvorostyanov VI. Numerical cloud modeling. Moscow: Gidrometeoizdat; 1984. 185 p. (In Russ.).
3. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Shapovalov AV, Shapovalov VA. Cloud physics and active weather modification. Nalchik: Pechatny Dvor; 2017. 240 p. (In Russ.).
4. Veremey NE, Dovgalyuk YuA, Zatevakhin MA, Ignat'ev AA, Morozov VN, Pastushkov RS. Description of a baseline non-stationary three-dimensional convective cloud model. Trudy Glavnoi Geofizicheskoi Observatorii. 2016;(282):45-91. (In Russ.).
5. Straka J. Cloud and Precipitation Microphysics: Principles and Parameterizations. Cambridge: Cambridge University Press; 2009. 408 p.
6. Abshaev MT, Abshaev AM, Barekova MV, Malkarova AM. Guidelines for organizing and conducting hail suppression operations. Nalchik: Pechatny Dvor; 2014. 508 p. (In Russ.).
7. Koloskov BP, Korneev VP, Shchukin GG. Methods and techniques for cloud, precipitation, and fog modification. St. Petersburg: RSHMU Publishing House; 2012. 342 p. (In Russ.).
8. Mazin IP, Shmeter SM. Clouds: Structure and physics of formation. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1983. 279 p. (In Russ.).
9. Kholodniok M, Klich A, Kubichek M, Marek M. Methods of nonlinear dynamical systems analysis. Moscow: Mir Publishers; 1991. 368 p.
10. Pruppacher HR, Klett JD. Microphysics of Clouds and Precipitation. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company; 1978. 714 p.
11. Khorguani VG. Microphysics of hail initiation and growth. Moscow: Gidrometeoizdat; 1984. 186 p. (In Russ.).

12. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Shapovalov VA, Lesev VN, Sherieva MA. Numerical simulation of the impact of atmospheric wind field structure on macro- and microphysical characteristics of convective clouds. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022;58(6):669-680. (In Russ.).
13. Mazin IP, Shmeter SM. On the deformation of meteorological element fields in the cumulus cloud zone. In: *Questions of Cloud Physics*. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1978. P. 135–167. (In Russ.).
14. Browning KA, Foote GB. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. *National Hail Research Experiment*; 1975. Tech. Rep. No. 75/1. 75 p.
15. Pastushkov RS. Numerical modeling of active influences on convective clouds: current trends, unsolved problems, emerging issues (based on publications from 2007-2010). In: *Reports of the All-Russian Conference on Cloud Physics and Active Influences on Hydrometeorological Processes*. Nalchik: Pechatny Dvor LLC; 2013. P. 16–25. (In Russ.).

Информация об авторах

Борис Азреталиевич Ашабоков – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом физики облаков ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», заведующий отделом ИИПРУ КБНЦ РАН, Scopus ID: 6505916110, Researcher ID: K-4299-2015.

Игорь Сергеевич Афанасьев – аспирант, направление подготовки 05.06.01 – Науки о Земле, направленность: 1.6.18 «Науки об атмосфере и климате», ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Researcher ID: AEO-9994-2022.

Зухура Сайдуллаховна Гаева – кандидат физико-математических наук, с.н.с., отдел физики облаков ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Scopus ID: 14051805000, AuthorID: 141744.

Виталий Александрович Шаповалов – доктор физико-математических наук, доцент, зав. лаборатории математического моделирования ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»; Scopus ID: 57190966150; WOS RESEARCH ID: J-9696-2015 AuthorID: 178219; Spin код: 6938-9800.

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

Information about the

Boris A. Ashabokov – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Head of the Department of Cloud Physics of the Federal State Budgetary Institution “High Mountain Geophysical Institute”, Head of Department, IIRMP, KBSC RAS. Scopus ID: 6505916110, Researcher ID: K-4299-2015.

Igor S. Afanasyev – postgraduate student, 05.06.01 – Earth Sciences, 1.6.18 “Atmospheric and climate sciences”, Federal State Budgetary Institution “High Mountain Geophysical Institute”, Researcher ID: AEO-9994-2022.

Zukhura S. Gaeva – Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher, Cloud Physics Department, Federal State Budget Institution “High-Mountain Geophysical Institute”, Scopus ID: 14051805000, AuthorID: 141744.

Vitaly A. Shapovalov – Dr. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, Head of the Laboratory of Mathematical Modeling, Federal State Budget Institution “High-Mountain Geophysical Institute”, Scopus ID: 57190966150, Web of Science ResearcherID: J-9696-2015, AuthorID: 178219, SPIN Code: 6938-9800.

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



Научная статья
УДК 551.557.59
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.5>

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОНДЕНСАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КЛАСТЕРОВ ОКСИДА ЦИНКА

Сафият Омаровна Геккиева^{1*},
Алим Хадисович Будаев²

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

¹ sgekkieva@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8369-812X>

² budayalim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3481-8663>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Объектом исследования являются кластеры из наночастиц оксида цинка. В данной статье представлены результаты исследований конденсационных свойств оксида цинка как перспективного реагента для рассеяния туманов. Как известно оксид цинка (ZnO) является гидрофильным веществом, однако его свойства в отношении воды могут меняться в зависимости от условий, в которых он находится, и от структуры его поверхности. Исследования были проведены на лабораторных установках Высокогорного геофизического института в искусственной облачной среде при положительных температурах. Использован комплекс аппаратуры, в составе которого большая облачная камера, счетчик частиц, генератор тумана. В большую облачную камеру закладывают реагент, создают искусственный туман и проводят термическую возгонку реагента. Перед возгонкой и после нее проводят отбор проб счетчиком частиц. На дне облачной камеры открывают подложки для сбора капель, которые изучают микроскопом. Для определения гигроскопической точки оксида цинка образец оксида цинка размещают под стеклянным колпаком и создают вакуум при определенной температуре. Постепенно вносят водяной пар, повышая относительную влажность и определяют количество адсорбированной воды. В результате было установлено, что при возгонке оксида цинка начинает успешно адсорбироваться больше водяного пара уже при относительной влажности 75–80 % и образуются более крупные капли. Благодаря гигроскопичной микроструктуре ZnO, которая притягивает большое ко-

личество водяного пара и быстрее превращает его в жидкость, концентрация капель размером 10 мкм увеличивается в 20 раз, а концентрация капель в 25 мкм увеличивается в 9 раз относительно фона.

Получено, что искусственный туман полностью рассеивается через 5 минут после внесения оксида цинка. Без воздействия реагентом видимость в облачной камере начала меняться через 15 минут и туман полностью рассеялся в течение 25 минут.

Ключевые слова: реагент, оксид цинка, гидрофильная поверхность, образование капель воды, материалы для рассеяния тумана

Для цитирования: Геккиева С. О., Будаев А. Х. Лабораторные исследования конденсационных свойств кластеров оксида цинка // Наука. Инновации. Технологии. 2026. № 2. С. 91–112. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.5>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 08.12.2026;
одобрена после рецензирования 06.04.2026;
принята к публикации 27.04.2026.

**1.6.18. Atmospheric and climate sciences
(physical and mathematical sciences)**
Research article

**Laboratory studies of condensation properties
of zinc oxide clusters**

**Safiyat O. Gekkieva^{1*},
Alim Kh. Budaev²**

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

¹ sgekkieva@list.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8369-812X>

² budayalim@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3481-8663>

* Corresponding author

Abstract.

The object of the study is clusters of zinc oxide nanoparticles. The article studies of the condensation properties of zinc oxide as a promising reagent for fog dispersion. Zinc oxide (ZnO) is known to be a hydrophilic substance, but its properties in relation to water may vary depending on the conditions in which it is located and the structure of its sur-

face. The research was carried out at laboratory facilities of the High-Altitude Geophysical Institute in an artificial cloudy environment at positive temperatures. A set of equipment was used, including a large cloud chamber, a particle counter, and a fog generator. A reagent is placed in a large cloud chamber, an artificial fog is created, and the reagent is thermally sublimated. Before and after distillation, a particle counter is sampled. At the bottom of the cloud chamber, substrates are opened to collect droplets, which are examined with a microscope. To determine the hygroscopic point of zinc oxide, a zinc oxide sample is placed under a glass cap and vacuum is created at a certain temperature. Water vapor is gradually introduced, increasing the relative humidity and determining the amount of adsorbed water. As a result, it was found that during the sublimation of zinc oxide, more water vapor begins to be successfully adsorbed already at a relative humidity of 75-80 % and larger droplets are formed. Due to the hygroscopic microstructure of ZnO, which attracts a large amount of water vapor and turns it into liquid faster, the concentration of droplets of 10 microns increases by 20 times, and the concentration of droplets of 25 microns increases by 9 times relative to the background. It was found that the artificial fog completely dissipates 5 minutes after the application of zinc oxide. Without exposure to the reagent, visibility in the cloud chamber began to change after 15 minutes and the fog completely dissipated within 25 minutes.

Keywords: reagent, zinc oxide, hydrophilic surface, water droplet formation, fog scattering materials

For citation: Gekkieva SO, Budaev AK. Laboratory studies of condensation properties of zinc oxide clusters. Science. Innovations. Technologies. 2026;(2):91-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.5>

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

The article was submitted 08.12.2026;
approved after reviewing 06.04.2026;
accepted for publication 27.04.2026.

Введение

В настоящее время возможность эффективно воздействовать на теплые облака и туманы является актуальным и практически значимым вопросом не только для физики облаков и целого ряда дисциплин, но и для экономики в целом. Туман является одним из опасных явлений погоды, поскольку он оказывает негативное влияние на работу всех видов транспорта, ухудшает экологическое состояние воздушного бассейна городов, приводит к ухудшению самочувствия людей при целом ряде заболеваний и т.д. Распределение туманов по территории Центрального Кавказа и Предкавказья имеет сложный характер [1]. Воздействие на туманы с целью их рассеяния ведутся в связи с необходимостью увеличения дальности видимости во избежание катастроф, т.к. по статистике более трети всех самых серьезных автомобильных аварий происходит из-за плохой видимости на дорогах [2]. С помощью активных воздействий можно как подавить развитие метеорологического процесса, так и стимулировать его, в зависимости от цели проекта [3, 4]. Например, одним из способов рассеяния туманов является использование высокотемпературных источников тепловой энергии, работа которых приводит к испарению тумана в зоне воздействия [5]. Также разработаны способы воздействия на туманы с помощью гигроскопических реагентов [6], коронного разряда и пористых фильтрующих материалов [7, 8].

Известно, что микроструктура тумана относительно стабильна и при положительных температурах состоит из капель воды радиусом 2-5 мкм [9]. В тумане происходят одновременно конденсационные процессы и коагуляция капель [10, 11]. Эффективность воздействия на туманы зависит от метеорологических параметров туманов. К примеру, чем выше температура тумана, тем эффективнее воздействие; чем больше его влажность, тем тяжелее рассеять [12]. Для рассеяния тумана нередко используют реагенты, которые ускоряют конденсационные процессы, вызывая перегонку влаги с капель на частицы реагента. Возможности воздействия на теплые облака и туманы ограничены из-за относительной устойчивости микроструктуры теплых облаков и туманов. В наших экспериментах предлагается для нарушения устойчивости в облако или туман

ввести частицы тонкодисперсного порошка оксида цинка (размерами от 0,001 до 0,01 мм), которые ввиду своих гигроскопических свойств могли бы быстро расти. При высокой температуре возгонки оксида цинка формируются нанотрубки различных модификаций и размеров, которые активно взаимодействуют с переохлажденной облачной средой в принятом интервале температур [13].

В данной работе представлены результаты исследований конденсационных свойств оксида цинка. Оксид цинка ZnO имеет на поверхности гидроксильные группы (ОН), которые взаимодействуют с водой, также он обладает гигроскопической пленкой, которая появляется на них в результате захвата мелких капель или благодаря поверхностной конденсации [14].

Для сравнения проведены фоновые исследования. Также приводится описание комплекса аппаратуры, метод исследования конденсационных свойств оксида цинка и результаты лабораторных исследований.

Материалы и методы исследований

В качестве информационных источников использованы результаты изучения данных бурения и испытаний скважин. Для проведения исследований конденсационных свойств оксида цинка разработан комплекс аппаратуры [15], в который входит большая облачная камера, счетчик частиц, устройство для возгонки реагента, генератор тумана, весы, оптический микроскоп, термогигрометр ТКА-ПКМ 24, аспирационный психрометр МВ-4М (рис. 1).

Большая облачная камера оснащена датчиками для контроля температуры и относительной влажности. К камере через трубу подсоединен генератор тумана, в камере установлены вентиляторы для перемешивания смеси пара и реагента. Спектр капель в камере измеряли с помощью счетчика частиц Lasair III. Пороговые значения измерительных каналов: 0,3; 0,5; 1,0; 5,0; 10,0; 25,0 мкм, что соответствует минимальным размерам частиц, регистрируемых в этих каналах. Технические возможности счетчика частиц Lasair III позволяют его использовать в настоящих исследованиях [16].

Пробоотборник был установлен в камере, а данные распечатывались со встроенного в измеритель принтера. Для фиксации ка-

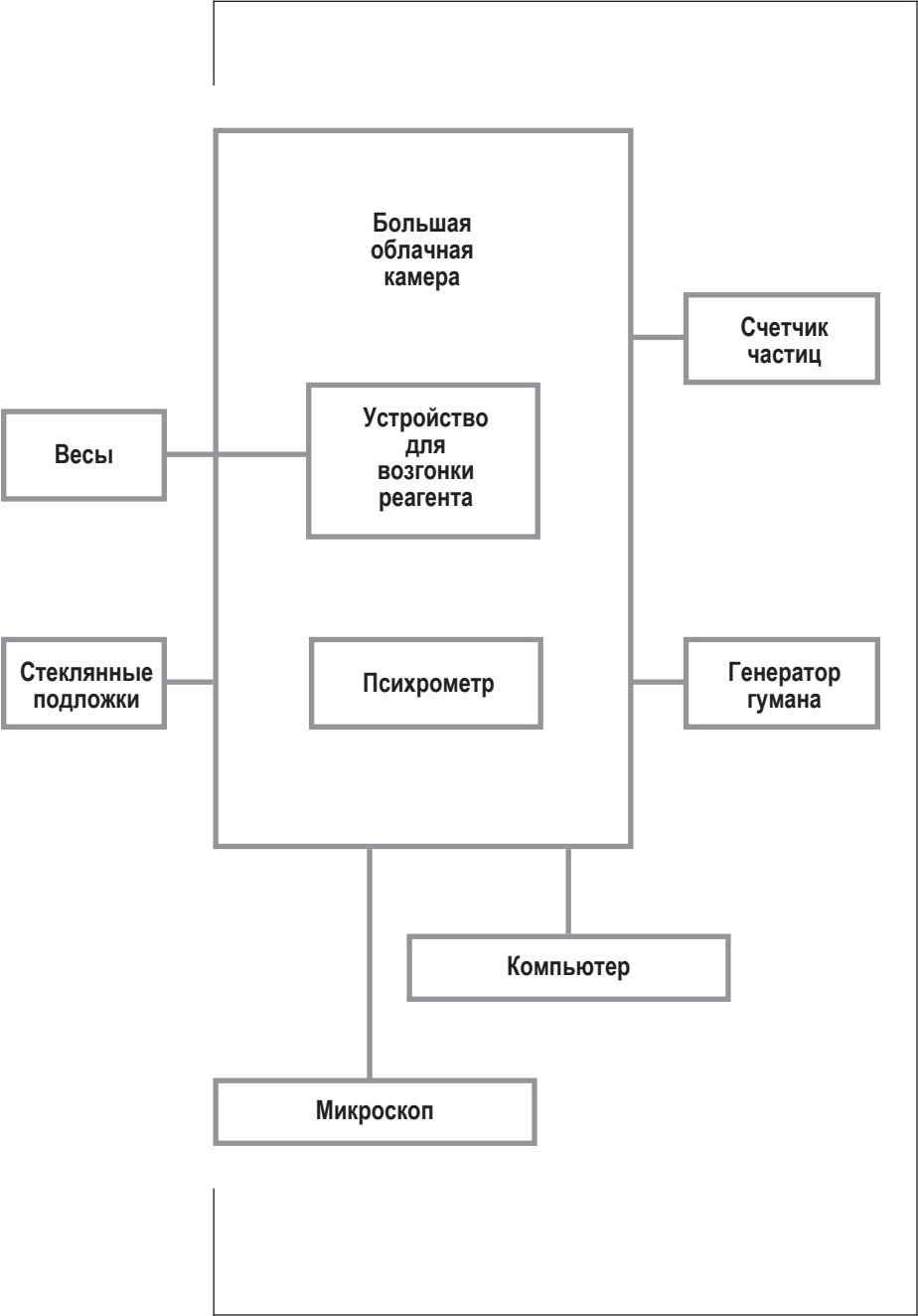


Рис. 1. Комплекс аппаратуры для проведения экспериментов.
Fig. 1. A complex of equipment for conducting experiments.

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

пель использовали стеклянные подложки, на поверхность которых был нанесен специальный состав из смеси трансформаторного масла, парафина и вазелина.

Перед началом каждого эксперимента термогигрометром и психрометром измеряли относительную влажность в облачной камере. Уровень требуемой влажности поддерживали, регулируя скорость потока пара в камеру. Контроль и регулировка температуры воздуха в камере проводился с помощью термореле холодильной установки, которое включает и отключает холодильные агрегаты при заданной температуре. Термореле расположено на внешней стенке облачной камеры, а датчик выведен внутрь камеры.

Предварительно на электронных весах взвешивают навеску из мелкоизмельченного цинка и размещают на графитовой подложке устройства для возгонки реагента. На дне камеры размещают стеклянные подложки, предварительно накрытые крышками. Проводят замер фоновых концентраций капель. В камеру вносят пар для создания искусственной облачной среды и включают счетчик частиц. Во время отбора проб открывают подложки для улавливания капель. Их извлекают и фотографируют в поле оптического микроскопа.

После замеров фоновых значений спектра капель в камере снова создают искусственную облачную среду и проводят возгонку цинка. Повторяют отбор проб счетчиком частиц и осаждение капель на подложки. В завершение эксперимента в журнале фиксируют условия эксперимента, данные по спектрам капель, после чего анализируют полученные данные.

Для каждого эксперимента загрузка образцов материалов составляет 0,01 г. Лабораторные исследования проводились в температурном диапазоне от +1 до +10 °C, образцы изучались через 1, 2 и 3 минуты после возгонки ZnO.

Для определения гигроскопической точки (Rh) для оксида цинка разработан экспериментальный комплекс оборудования, который включает вакуумный пост, электронные весы, источник водяного пара, муфельная печь (рис. 2).

Определенное количество полученного в большой облачной камере оксида цинка взвешивают на электронных весах большой

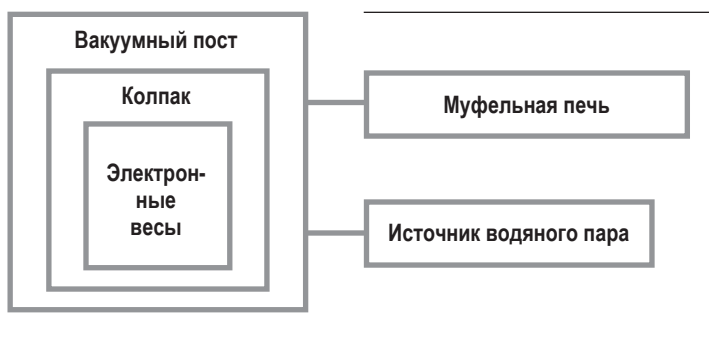


Рис. 2.

Комплекс аппаратуры для определения гигроскопической точки.

Fig. 2. A complex of equipment for determination of hygroscopic point.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

точности, после чего микронавеску высушивают в муфельной печи при температуре 200 °С; после высушивания образец снова взвешивают и помещают под колпак вакуумного поста на датчик электронных весов, после чего создают высокий вакуум. Устанавливают требуемое значение температуры и начальное значение относительной влажности, после чего вводят водяной пар из емкости, регулируя условия эксперимента. Эксперимент проводят до установления равновесной массы. Затем повторяют эксперимент, увеличивая парциальное давление водяного пара до достижения значений насыщенного водяного пара.

В каждом эксперименте определяют равновесное количество поглощаемых паров воды сухим веществом (влажность вещества – W), то есть изотерму адсорбции паров воды веществом как $W = M_{\text{H}_2\text{O}} * 100 / M_{\text{в-ва}}$, % масс., где $M_{\text{H}_2\text{O}}$ – масса поглощенных паров воды, г; $M_{\text{в-ва}}$ – масса сухого вещества, г.

Как известно, гигроскопические свойства веществ различны. Степень и интенсивность поглощения водяных паров зависят как от химического состава вещества, так и от содержания водяных паров в воздухе [17]. Благодаря наличию гидроксильных групп на своей поверхности и шероховатой морфологии ZnO может притягивать и удерживать молекулы воды на своей поверхности.

Результаты исследований и их обсуждение

В рамках экспериментов были изучены гигроскопические свойства оксида цинка. Исследования проводились при относительной влажности от 0 до 100 %, температуре +25 °С и атмосферном давлении 720 мм рт. ст.

В таблице 1 приведены результаты экспериментов по определению гигроскопической точки (Rh) для оксида цинка.

Таблица 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИГРОСКОПИЧНОСТИ ОКСИДА ЦИНКА
Table 1. Results of laboratory tests of zinc oxide hygroscopicity

Rh, %	M _{H2O} , г	M _{в-ва} , г	W, %
0	0,0	0,01	0,00
5	0,000049	0,01	0,50
10	0,000151	0,01	1,50
15	0,000166	0,01	1,66
20	0,000186	0,01	1,86
25	0,000194	0,01	1,94
30	0,000209	0,01	2,00
35	0,000211	0,01	2,10
40	0,000250	0,01	2,50
45	0,000266	0,01	2,66
50	0,000276	0,01	2,76
55	0,000288	0,01	2,88
60	0,000292	0,01	2,92
65	0,000301	0,01	3,00
70	0,000302	0,01	3,02
75	0,000404	0,01	4,04
80	0,000752	0,01	7,50
85	0,000905	0,01	9,05
90	0,000938	0,01	9,38
95	0,000951	0,01	9,50
100	0,000983	0,01	9,80

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

Результаты исследований показали, что оксид цинка при относительной влажности 75–80 % начинает активно проявлять свои гидрофильные свойства. Согласно [18] конденсация воды на поверхности может происходить спонтанно только при относительной влажности не менее 100 %.

Конкретные требования к температуре и влажности определяются в зависимости от того, какие именно свойства оксида цинка исследуются. В настоящее время существуют исследования, в которых описываются некоторые особенности эффективного использования конденсационных свойств оксида цинка для воздействия на облачные процессы. Авторы работы полагают, что частицы оксида необходимо исследовать в облачной среде, на которую следует воздействовать [19]. Для каждого значения температуры/влажности было выполнено по 8–10 экспериментов. В таблицах 1 и 2 представлены средние значения. При выбранном показателе уровня значимости в 0,05, полученные результаты попадают в категорию «статистически значимые», и не являются случайностью, а отражают реальный эффект при использовании оксида цинка.

В таблицах 2, 3 и на рисунках 4 и 5 приведены результаты исследований фоновых значений спектра капель, а также их изменение после внесения оксида цинка. В эксперименте были учтены все капли размером μ от 0,3 до 25 мкм в температурном диапазоне от +1 до +10 °C.

Анализ полученных результатов показал, что количество капель всех размеров возрастает. Количество капель размерами 5–10 мкм увеличивается, превышая фоновые значения на порядок. Появляются капли размерами 25 мкм в температурном диапазоне +4...+7 °C, хотя до возгонки в фоновых показателях они отсутствовали, или их количество не превышало нескольких десятков. Резкий рост капель размерами 5–10–25 мкм является показателем эффективности оксида цинка. Ожидается, что повышение концентрации данного спектра капель будет способствовать быстрой адсорбции, конденсации и образованию капли воды, чтобы впоследствии в процессе коагуляции вырасти в более крупный размер капли, что может привести к эффективному рассеянию тумана [20].

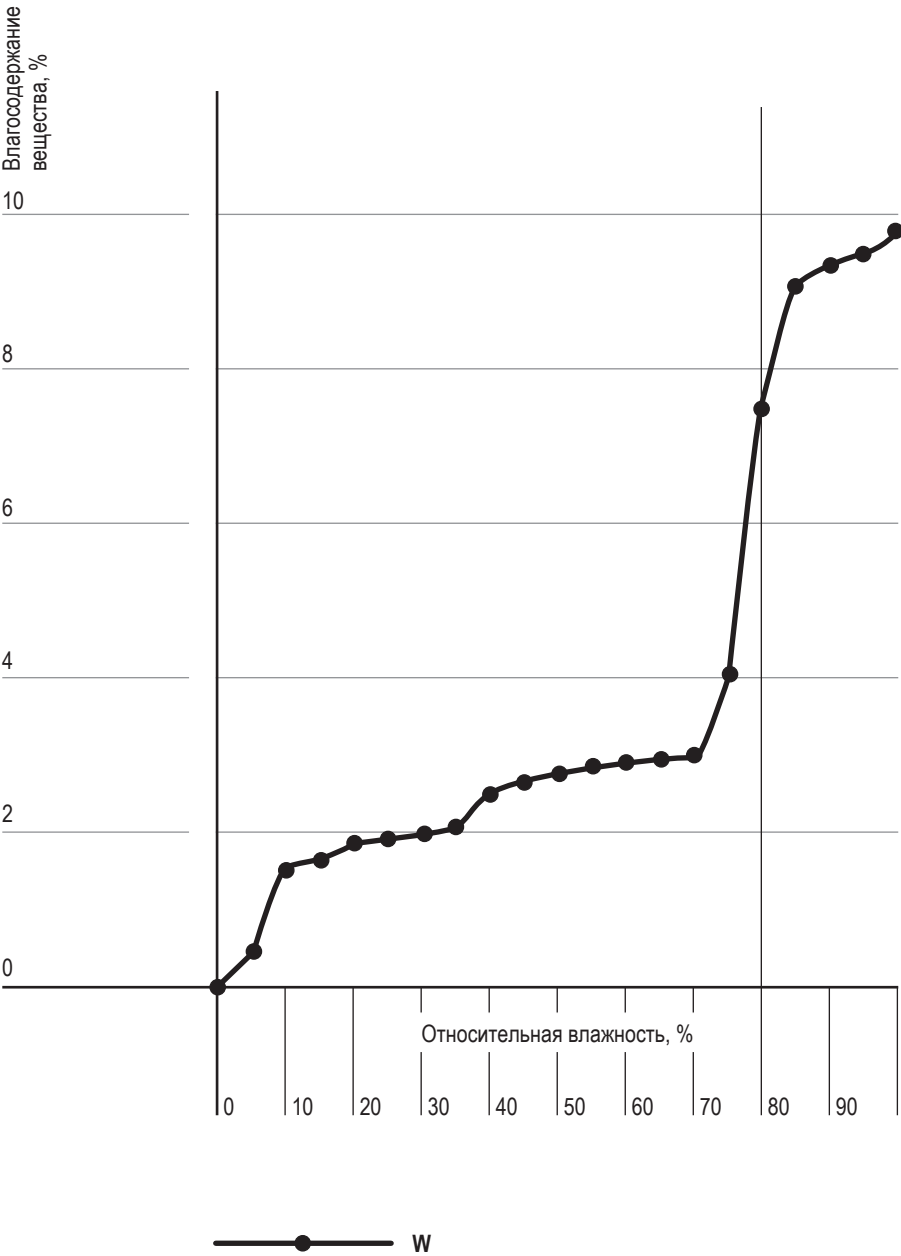


Рис. 3. Зависимость гигроскопичности оксида цинка при различных значениях относительной влажности.
Fig. 3. Dependence of zinc oxide hygroscopicity at different relative humidity values.

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

Таблица 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
КОНЦЕНТРАЦИИ И РАЗМЕРА КАПЕЛЬ (ДО ВНЕСЕНИЯ РЕАГЕНТА
И ЧЕРЕЗ 1 МИНУТУ ПОСЛЕ)
Table 2. Results of laboratory tests of droplet concentration and size
(before reagent application and 1 minute after)

t, °C μ, МКМ	0,3	0,5	1	5	10	25
Фоновые значения концентрации, м ³						
+1	22,5×10 ⁶	30,9×10 ⁶	21,3×10 ⁶	960	240	1
+2	10,8×10 ⁶	25,0×10 ⁶	69,3×10 ⁶	5161	840	1
+3	28,1×10 ⁶	31,0×10 ⁶	16,7×10 ⁶	2521	1	1
+4	13,5×10 ⁶	31,0×10 ⁶	41,1×10 ⁶	1580	100	40
+5	25,2×10 ⁶	29,0×10 ⁶	20,6×10 ⁶	960	80	1
+6	13,0×10 ⁶	30,7×10 ⁶	47,1×10 ⁶	1939	240	1
+7	39,0×10 ⁶	32,8×10 ⁶	6,7×10 ⁶	440	140	1
+8	11,1×10 ⁶	26,1×10 ⁶	66,7×10 ⁶	2600	300	20
+9	31,4×10 ⁶	32,5×10 ⁶	13,8×10 ⁶	4680	360	1
+10	5,8×10 ⁶	7,5×10 ⁶	90,7×10 ⁶	0,2×10 ⁶	140	20
Через 1 минуту после внесения реагента, м ³						
+1	14,1×10 ⁶	30,4×10 ⁶	39,4×10 ⁶	15238	360	0
+2	16,4×10 ⁶	31,9×10 ⁶	33,6×10 ⁶	9240	480	0
+3	27,9×10 ⁶	38,1×10 ⁶	11,1×10 ⁶	7681	120	0
+4	30,9×10 ⁶	36,8×10 ⁶	8,7×10 ⁶	34110	3539	80
+5	27,9×10 ⁶	41,4×10 ⁶	7,4×10 ⁶	18940	1600	0
+6	13,5×10 ⁶	30,5×10 ⁶	46,2×10 ⁶	14299	740	20
+7	24,3×10 ⁶	40,6×10 ⁶	13,2×10 ⁶	32180	4000	40
+8	11,1×10 ⁶	26,1×10 ⁶	65,5×10 ⁶	13142	780	0
+9	9,7×10 ⁶	23,4×10 ⁶	74,7×10 ⁶	9919	980	0
+10	4,8×10 ⁶	2,3×10 ⁶	88,1×10 ⁶	1,5×10 ⁶	680	0

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

Таблица 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
КОНЦЕНТРАЦИИ И РАЗМЕРА КАПЕЛЬ
(ЧЕРЕЗ 2, 3 МИНУТЫ ПОСЛЕ ВНЕСЕНИЯ РЕАГЕНТА)
Table 3. Results of laboratory tests of droplet concentration and size
(2, 3 minutes after applying the reagent)

t, °C μ, мкм	0,3	0,5	1	5	10	25
Через 2 минуты после внесения реагента, м ³						
+1	12,7×10 ⁶	31,8×10 ⁶	43,0×10 ⁶	10579	353	1
+2	15,1×10 ⁶	33,4×10 ⁶	32,6×10 ⁶	4859	280	1
+3	24,5×10 ⁶	40,1×10 ⁶	11,4×10 ⁶	5727	326	1
+4	26,3×10 ⁶	37,5×10 ⁶	11,3×10 ⁶	26416	2859	80
+5	23,4×10 ⁶	40,3×10 ⁶	12,2×10 ⁶	13693	1120	20
+6	13,2×10 ⁶	26,3×10 ⁶	58,3×10 ⁶	13379	820	20
+7	25,8×10 ⁶	37,9×10 ⁶	15,4×10 ⁶	23041	2380	50
+8	11,7×10 ⁶	24,1×10 ⁶	68,8×10 ⁶	12574	760	10
+9	10,5×10 ⁶	22,0×10 ⁶	75,2×10 ⁶	13905	1266	1
+10	4,8×10 ⁶	1,3×10 ⁶	91,3×10 ⁶	960	200	20
Через 3 минуты после внесения реагента, м ³						
+1	14,1×10 ⁶	30,4×10 ⁶	39,6×10 ⁶	16199	600	1
+2	17,1×10 ⁶	31,8×10 ⁶	32,2×10 ⁶	5278	360	1
+3	26,5×10 ⁶	38,3×10 ⁶	12,0×10 ⁶	9242	840	1
+4	27,4×10 ⁶	34,7×10 ⁶	14,3×10 ⁶	43400	4840	160
+5	24,1×10 ⁶	35,4×10 ⁶	16,8×10 ⁶	21580	1700	60
+6	10,4×10 ⁶	24,9×10 ⁶	69,3×10 ⁶	24058	1340	20
+7	22,7×10 ⁶	38,5×10 ⁶	17,4×10 ⁶	36904	3140	120
+8	10,2×10 ⁶	24,6×10 ⁶	71,0×10 ⁶	24462	1440	20
+9	9,5×10 ⁶	23,0×10 ⁶	75,4×10 ⁶	28418	2680	1
+10	4,1×10 ⁶	94419	77,9×10 ⁶	6,4×10 ⁶	1180	1

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

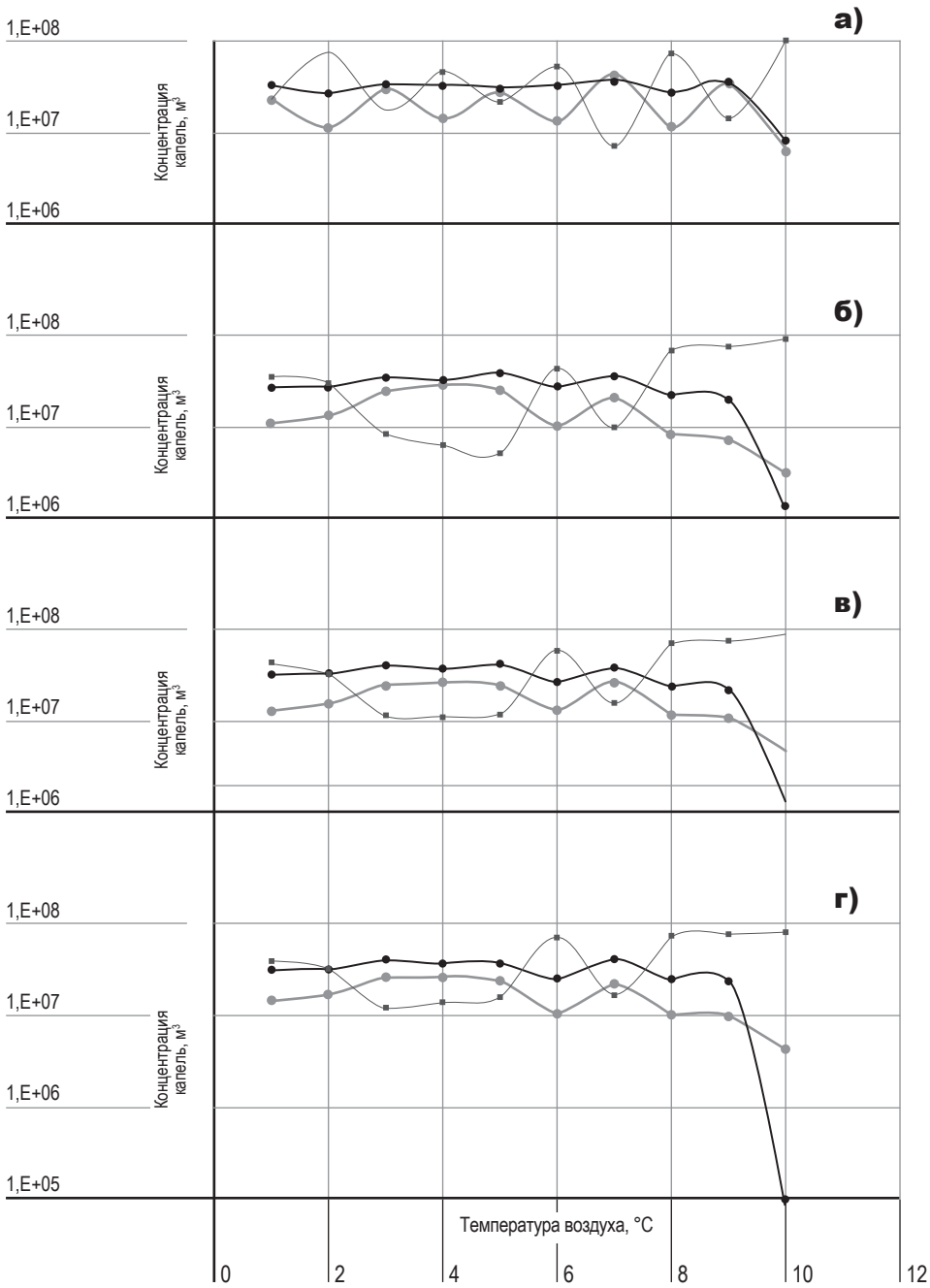


Рис. 4.

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

Значения концентраций капель размерами 0,3–1 мкм: а) до воздействия ZnO; б) через 1 мин после воздействия; в) через 2 мин после воздействия; г) через 3 мин после воздействия.
Fig. 4. Concentration values of 0,3–1 micron droplets: а) before exposure to ZnO; б) 1 minute after exposure; в) 2 minutes after exposure; г) 3 minutes after exposure.

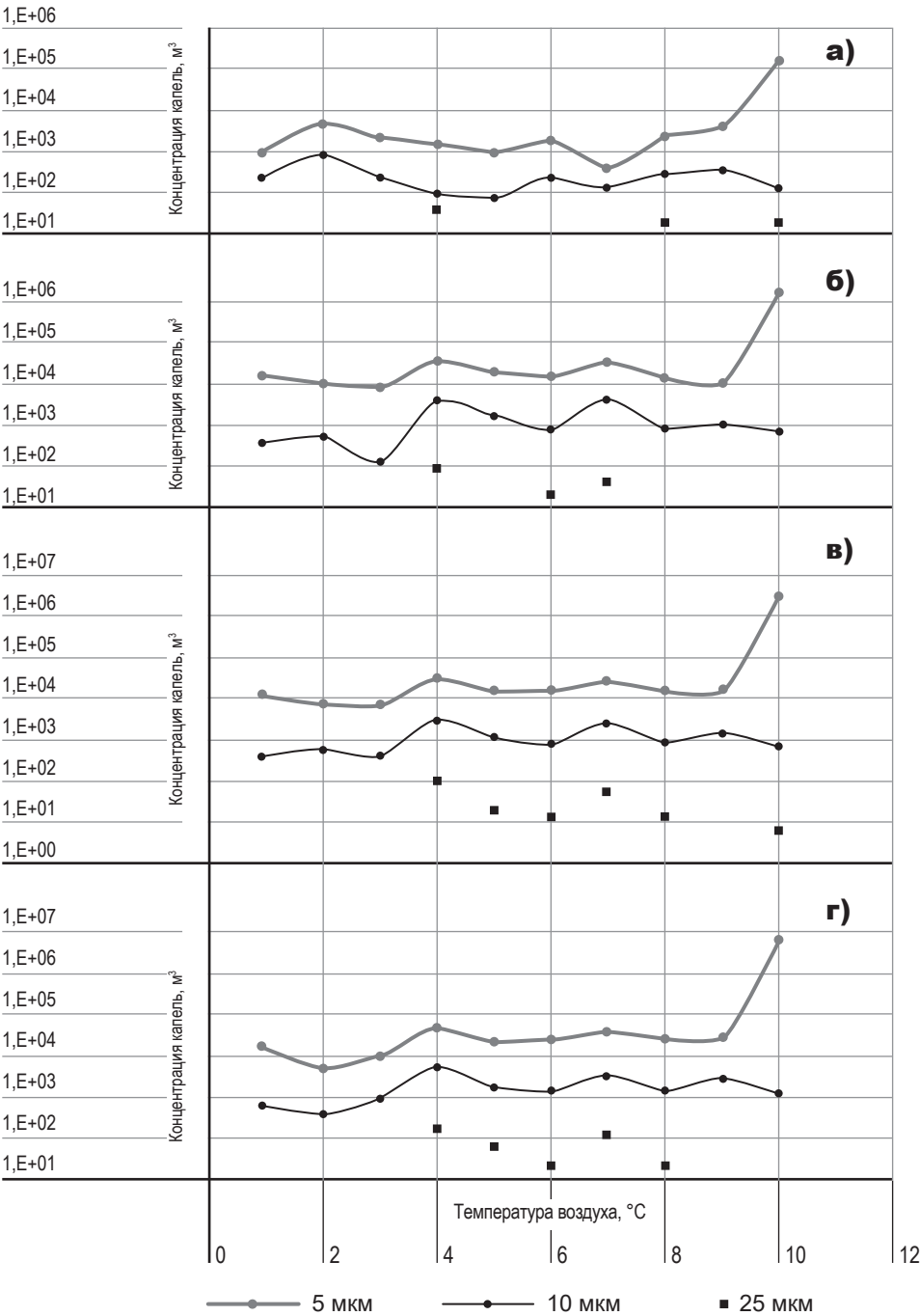


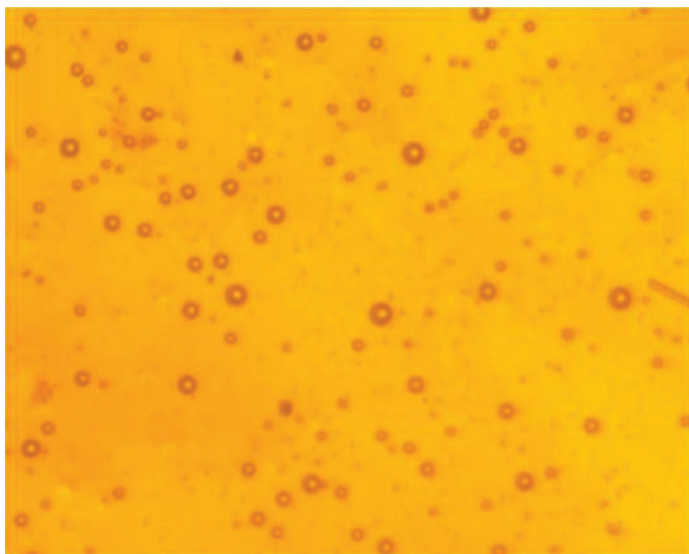
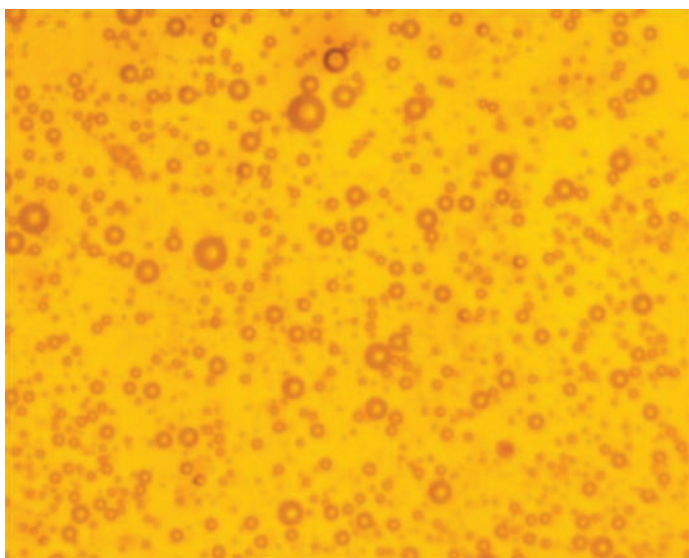
Рис. 5.

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

Значения концентраций капель размерами 5–25 мкм: а) до воздействия ZnO; б) через 1 мин после воздействия; в) через 2 мин после воздействия; г) через 3 мин после воздействия.

Fig. 5. Concentration values of droplets measuring 5–25 microns: a) before exposure to ZnO; b) 1 minute after exposure; c) 2 minutes after exposure; d) 3 minutes after exposure.

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

а)**б)****Рис. 6.**

Стекло́нная подложка с каплями: а – фо́новые значения; б – че́рез 3 ми́н после внесе́ния реагента.

Fig. 6. Glass substrate with droplets: a – background values; b – 3 minutes after applying the reagent.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

На рисунке 6 представлены фотографии подложки с каплями до и после внесения реагента. Фоновая проба бралась непосредственно перед внесением реагента в камеру. Вторая проба бралась через 3 минуты после внесения реагента. В обоих случаях температура в облачной камере составляла $+5^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 100%. Как видно на фотографии, количество капель после воздействия оксидом цинка значительно выше, чем фоновая концентрация капель.

Заключение

Проведена серия лабораторных исследований конденсационных свойств оксида цинка, которая показала, что при достижении отдельными каплями радиуса 20–25 мкм, образовавшиеся капли воды непрерывно растут за счёт гравитационной коагуляции, до тех пор, пока не станут достаточно большими, чтобы выпасть в виде осадков. Мелкие капли разносятся в разные стороны, потому что они падают медленнее и дольше остаются в воздухе во взвешенном состоянии. С повышением относительной влажности водопоглощающая способность оксида цинка увеличивается, однако ниже своей гигроскопической точки (75–80%) не проявляют заметной адсорбции водяного пара. Гигроскопическая точка оксида цинка была определена экспериментальным путем на лабораторных установках.

Исследования выявили, что частицы оксида цинка адсорбируют больше водяного пара, что способствует образованию более крупных капель воды. После внесения оксида цинка в камеру, концентрация и размер капель значительно увеличились во всех диапазонах размеров. Особенно при 100% влажности и в диапазоне температур от $+4$ до $+7^{\circ}\text{C}$ концентрация капель, вызванный частицами оксида цинка, размером 10 мкм увеличивается в 20 раз, а концентрация капель в 25 мкм увеличивается в 9 раз относительно фона.

Для сравнительного анализа перед возгонкой цинка в камере был создан искусственный туман с относительной влажностью 100%. Эксперименты 15 мин. После возгонки оксида цинка в облачной камере искусственный туман полностью рассеивается через 5 минут. Гигроскопические характеристики оксида цинка позволяют его рассматривать как эффективный реагент для стабилизации теплых облаков и туманов.

Список источников

1. Смерек Ю. Л., Волкова В. И., Барекова М. В., Бадахова Г. Х. Климатология туманов в Центральном Предкавказье // Наука. Инновации. Технологии. 2023. № 2. С. 143–176.
2. Симакина Т. Е., Крюкова С. В. Основы активных воздействий на атмосферные процессы: учебное пособие / Симакина Т. Е., Крюкова С. В. Санкт-Петербург: РГМУ, 2024. 98 с.
3. Бекряев В. И. Некоторые вопросы физики облаков и активных воздействий на них: учебное пособие / В. И. Бекряев. Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2007. 337 с.
4. Доронин А. П. Воздействия на атмосферные процессы и явления / Учебное пособие. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2014. 292 с.
5. Калов Х. М., Калов Р. Х. Активные воздействия на теплые туманы и инструментальное определение их эффективности // Наука. Инновации. Технологии. 2019. № 1. С. 145–162.
6. Ватиашили М. Р., Джанелидзе И. С. Исследование морских хлоридов и выбор наиболее эффективных в качестве гигроскопических реагентов в проектах по искусственному регулированию осадков и подавлению града // Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата: сборник трудов Второй международной научной конференции с элементами научной школы / под ред. М. Т. Абшаева, Г. Х. Бадаховой, В. И. Волковой. Ставрополь, 2015. С. 75–79.
7. Патент на изобретение RU 2781216 С1. Устройство для рассеивания тумана: № 2021124742: заявл. от 20.08.2021: опубл. 07.10.2022 / Алексеева А. В., Васильев А. С., Зинкина М. Д., Иванов В. Н., Палей А. А., Писанко Ю. В., Романов Н. П., Савченко А. В., Шилин А. Г.; заявитель ФГБУ «НПО «Тайфун». 10 с.
8. Патент на изобретение RU 2771179 С1. Устройство для рассеивания тумана: № 2021132136: заявл. 03.11.2021: опубл. 28.04.2022 / Алексеева А. В., Васильев А. С., Зинкина М. Д., Иванов В. Н., Палей А. А., Писанко Ю. В., Романов Н. П., Савченко А. В., Шилин А. Г.; заявитель ФГБУ «НПО «Тайфун». 9 с.
9. Амелин А. Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Химия, 1972. 304 с.
10. Junge C. Das Wachstum der Kondensationskerne mit der relative Feuchtigkeit // Annalen der Meteorologie. 1950. No. 3. P. 129–135.
11. Мейсон Б. Дж. Физика облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 542 с.
12. Качурин Л. Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 463 с.
13. Хучунаев Б. М., Панаэтов В. П., Хучунаев А. Б. Исследование обра-

- зования нанотрубок оксида цинка // Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели: материалы Международного симпозиума, посвященного 20-летию создания ФГБУ науки Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2013. С. 61–63.
14. Kenmoe S., Biedermann P.U. Water aggregation and dissociation on the ZnO (10 $\bar{1}$ 0) surface // *Chem Phys*. 2017 Jan 4, №19(2). P. 1466–1486. <https://doi.org/10.1039/c6cp07516a>
 15. Khuchunaev B. M., Gekkieva S. O. Investigations of the Formation of the Ice Phase on the Particles of the Reagent and Zinc Oxide Taking into Account the Influence of the Electric Field Strength. // Zakinyan, R., Zakinyan, A. (eds) *Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring. PAPCEM 2022. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. Springer, Cham, 2023. P. 233–240.
 16. Отчет о научно-исследовательской работе «Исследование льдообразующих и конденсационных свойств кристаллогидратов KI, нанотрубок AgI и ZnO и оценка возможности их использования для искусственного вызывания осадков». Отчет о НИР 1.6.6.1. ФГБУ «ВГИ», Нальчик, 2014. 30 с.
 17. Tereshchenko A. G. Deliquescence: Hygroscopicity of Water-Soluble Crystalline Solids // *J Pharm Sci*. 2015 Nov, №104(11). P. 3639–3652. <https://doi.org/10.1002/jps.24589>
 18. Harmon C. W., Grimm R. L., McIntire T. M., Peterson M. D., Njegic B., Angel V. M., Alshawwa A., Underwood J. S., Tobias D. J., Gerber R. B., Gordon M. S., Hemminger J. C., Nizkorodov S. A. Hygroscopic growth and deliquescence of NaCl nanoparticles mixed with surfactant SDS. *J Phys Chem B*; 2010, №114(7). P. 2435–2449.
 19. Предварительные результаты исследования конденсационных и льдообразующих свойств нанотрубок AgI и оксида цинка / В. О. Тапасханов, Б. М. Хучунаев, М. И. Тлисов, А. Б. Хучунаев, Г. В. Куповых. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. 2014. № 6. С. 40–43.
 20. Liang H., Abshaev M. T., Abshaev A. M., Huchunaev B. M., Griffiths S., & Zou L. Water vapor harvesting nanostructures through bioinspired gradient-driven mechanism. *Chemical Physics Letters*, 2019, №728. P.167–173.

References

1. Smerek YL, Volkova VI, Barekova MV, Badakhova GK. Climatology of fogs in the Central Ciscaucasia. *Science. Innovations. Technologies*. 2023;(2):143-176. (In Russ.).
2. Simakina TE, Kryukova SV. Fundamentals of active effects on atmospher-

- ic processes. Textbook / Simakina TE, Kryukova SV. St. Petersburg: Russian State Medical University; 2024. 98 p. (In Russ.).
3. Bekryaev VI. Some questions of cloud physics and active effects on them. Textbook / VI. Bekryaev. Saint Petersburg: Russian State Hydrometeorological University; 2007. 337 p. (In Russ.).
 4. Doronin AP. Effects on atmospheric processes and phenomena. Textbook. St. Petersburg: Military Space Academy named after AF. Mozhaisky; 2014. 292 p. (In Russ.).
 5. Kalov KM, Kalov RK. Active effects on warm mists and instrumental determination of their effectiveness. Science. Innovations. Technologies. 2019;(1):145-162. (In Russ.).
 6. Vatiashvili MR, Janelidze IS. Investigation of marine chlorides and selection of the most effective hygroscopic reagents in projects for artificial precipitation regulation and hail suppression. Innovative research methods and tools in the field of atmospheric physics, hydrometeorology, ecology and climate change. Proceedings of the Second International Scientific Conference with elements of a scientific school. 2015. P. 75-79. (In Russ.).
 7. Alekseeva AV, Vasiliev AS, Zinkina MD, Ivanov VN, Paley AA, Pisanko YV, Romanov NP, Savchenko AV, Shilin AG. Device for fog dispersion. Patent for invention RU 2781216 C1, 07.10.2022. Application 2021124742. Dated 08.20.2021. 10 p. (In Russ.).
 8. Alekseeva AV, Vasiliev AS, Zinkina MD, Ivanov VN, Paley AA, Pisanko YV, Romanov NP, Savchenko AV, Shilin AG. Device for fog dispersion. Patent for invention RU 2771179 C1, 04/28/2022. Application 2021132136. Dated 11.03.2021. 9 p. (In Russ.).
 9. Amelin AG. Theoretical foundations of fog formation during steam condensation. Moscow: Khimiya Publ.; 1972. 304 p. (In Russ.).
 10. Junge C. Das Wachstum der Kondensationskerne mit der relative Feuchtigkeit, Annalen der Meteorologie. 1950;(3):129-135. (In Germ.)
 11. Mason BJ. Cloud physics. L.: Hydrometeoizdat; 1961. 542 p. (In Russ.).
 12. Kachurin LG. Physical bases of influence on atmospheric processes. L.: Hydrometeoizdat; 1991. 463 p. (In Russ.).
 13. Khuchunaev BM, Panaetov VP, Khuchunaev AB. Investigation of the formation of zinc oxide nanotubes. Sustainable development: problems, concepts, models. Proceedings of the International Symposium dedicated to the 20th anniversary of the establishment of the Kabardino-Balkarian Scientific Research Center of the Russian Academy of Sciences. 2013; 61–63. (In Russ.).
 14. Kenmoe S, Biedermann PU. Water aggregation and dissociation on the ZnO (10 $\bar{1}$ 0) surface. Phys Chem Chem Phys. 2017 Jan 4;19(2):1466-1486. <https://doi.org/10.1039/c6cp07516a>

15. Khuchunaev BM, Gekkieva SO. Investigations of the Formation of the Ice Phase on the Particles of the Reagent and Zinc Oxide Taking into Account the Influence of the Electric Field Strength. Physics of the Atmosphere, Climatology and Environmental Monitoring. PAPCEM 2022. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham; 2023; 233–240.
16. Report on the research work 'Investigation of the ice-forming and condensation properties of KI crystallohydrates, AgI and ZnO nanotubes and assessment of the possibility of their use for artificial precipitation'. Research Report 1.6.6.1. High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik. 2014; 30 p. (In Russ.).
17. Tereshchenko AG. Deliquescence: Hygroscopicity of Water-Soluble Crystalline Solids. J Pharm Sci. Nov. 2015;104(11): 3639-3652.
18. Harmon CW, Grimm RL, McIntire TM, Peterson MD, Njegic B, Angel VM, Alshawa A, Underwood JS, Tobias DJ, Gerber RB, Gordon MS, Hemminger JC, Nizkorodov SA. Hygroscopic growth and deliquescence of NaCl nanoparticles mixed with surfactant SDS. J Phys Chem B. 2010;114(7):2435-2449.
19. Tapaskhanov VO, Khuchunaev BM, Tlisov MI, Khuchunaev AB, Kupovykh GV. Preliminary results of a study of condensation and ice-forming properties of AgI nanotubes and zinc oxide. Bulletin of higher educational institutions. The North Caucasus region. Natural sciences. 2014;(6):40-43. (In Russ.).
20. Liang H, Abshaev MT, Abshaev AM, Huchunaev BM, Griffiths S, Zou L. Water vapor harvesting nanostructures through bioinspired gradient-driven mechanism. Chemical Physics Letters. 2019;(728):167-173.

Информация об авторах

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

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

Вклад авторов

Геккиева Сафият Омаровна. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за

все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант. Редактирование текста – формирование черновика рукописи его окончательного варианта.

Будаев Алим Хадисович. Проведение исследования – проведение лабораторных исследований, интерпретация и анализ полученных данных, составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта. Подготовка текста – составление черновика рукописи, участие в научном дизайне.

Information about the authors

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

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

Contribution of the authors

Safiyat O. Gekkieva. Conducting research – data collection, analysis and interpretation. Approval of the final manuscript – acceptance of responsibility for all types of the work, integrity of all parts of the paper and its final version. Text preparation – the formation of a draft of the manuscript of its final version.

Alim Kh. Budaev. Conducting research – conducting laboratory tests, interpreting and analyzing the data obtained, drafting a manuscript and forming its final version. Text preparation – drafting of a manuscript, participation in scientific design.



Научная статья
УДК 622.279.51
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.6>

ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ ПЛАСТОВЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СИСТЕМ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

Розалия Кирилловна Добролюбова^{1*},
Екатерина Ивановна Инякина²,
Иван Игнатьевич Краснов³

^{1, 3} Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова в г. Мирном (д. 14, ул. Ойунского, Мирный, Республика Саха (Якутия) 678174, Российская Федерация)

² Тюменский индустриальный университет (д. 38, Володарского, Тюмень, 625000, Российская Федерация)

¹ rose941101@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3815-4550>

² injakinaei@tyuiu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6835-8955>

³ iikrasnov17@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6368-3289>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

В условиях разработки газоконденсатных залежей наряду с «сухими» газами в составе добываемой продукции содержатся жидкие углеводороды, которые при изменении пластовых условий за счет фазовых переходов не постоянны как по содержанию, так и по составу пластовой смеси. Поэтому для прогноза разработки целесообразно применение в геолого-технологическом моделировании данных экспериментальных исследований. Для композиционной PVT-модели (построение диаграмм фазовых процессов) необходимы результаты компонентного состава флюидов на текущий момент. Данный учет важен с целью получения корректных исходных параметров для прогнозирования разработки месторождения. В рамках работы отмечается, что для получения положительного результата с точностью порядка $\pm 3\div 5\%$ в процессе проведения исследований соблюдались такие условия, как: производительность промыслового сепаратора, обеспечивала унос капельной жидкости в составе пластовой смеси не более $4 \text{ см}^3/\text{м}^3$. На основании интегральных замеров при отборе сепарационных проб определялась величина конденсато-газового фактора (КГФ) и физико-химическая характеристика конденсата (плотность, динамическая вязкость и другие свойства).

На основании анализа полученных результатов, определен выход насыщенного конденсата (КГФ), который изменился в широком диапазоне и составил – от 69,8 г/м³ до 513,2 г/м³ газа сепарации. Изменение свойств газоконденсатной смеси прослеживается при снижении пластового давления с 29,89 до 26,33 МПа. Данное снижение давления привело к формированию в прискважинной зоне депрессионной воронки и привело к притоку двухфазной углеводородной смеси. Также по данным PVT-исследований построены зависимости выпавшей жидкой фазы от давления для изучаемой газоконденсатной системы. Экспериментально определен прогнозный коэффициент извлечения конденсата, измерены давления конденсации углеводородов пластовой системы.

Ключевые слова: фазовые диаграммы, PVT-исследования, прогноз давления конденсации, показатели разработки, газоконденсатная система

Для цитирования: Добролюбова Р.К., Инякина Е.И., Краснов И.И. Особенности свойств пластовых углеводородных систем при разработке газоконденсатных залежей // Наука. Инновации. Технологии. 2026. № 2. С. 113–148. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.6>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 28.03.2026;
одобрена после рецензирования 08.05.2026;
принята к публикации 10.06.2026.

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

Research article

Some features of the properties of reservoir hydrocarbon systems in the development of gas-condensate deposits

**Rozaliya K. Dobrolyubova^{1*},
Ekaterina I. Inyakina²,
Ivan I. Krasnov³**

^{1,3} Mirny Polytechnic Institute (branch) of North-Eastern Federal University (14, Oyunsky st., Mirny, Republic of Sakha (Yakutia) 678174, Russian Federation)

² Tyumen Industrial University (38, Volodarskogo, Tyumen, 625000, Russian Federation)

¹ rose941101@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3815-4550>

² injakinaei@tyuiu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6835-8955>

³ iikrasnov17@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-6368-3289>

* Corresponding author

Abstract.

During the development of gas condensate reservoirs, the extracted product contains not only "dry" gases but also liquid hydrocarbons. These hydrocarbons are unstable in both content and the composition of the reservoir mixture as reservoir conditions change due to phase transitions. Therefore, to forecast development, it is advisable to use experimental data in geological and technological modeling. The compositional PVT model (construction of phase process diagrams) requires current data on the component composition of fluids. This information is important for obtaining accurate initial parameters for field development forecasting. The study notes that to achieve a positive result with an accuracy of approximately ± 3 to 5%, the following conditions were met during the study: the capacity of the field separator ensured the entrainment of liquid droplets in the reservoir mixture of no more than $4 \text{ cm}^3/\text{m}^3$. Based on integrated measurements taken during separation sampling, the condensate-gas ratio (CGR) and the physicochemical characteristics of the condensate (density, dynamic viscosity, and other properties) were determined. Based on the analysis of the obtained results, the saturated condensate yield (SCY) was determined; it varied over a wide range, ranging from 69.8 g/m^3 to 513.2 g/m^3 of separation gas. Changes in the gas condensate mixture properties were observed with a decrease in reservoir pressure from 29.89 to 26.33 MPa. This decrease in pressure led to the formation of a depression funnel in the near-wellbore zone and resulted in the influx of a two-phase hydrocarbon mixture. Also, based on the PVT data, the dependences of the precipitated liquid phase on pressure were constructed for the gas condensate system under study. The predicted condensate recovery factor was experimentally determined, and the condensation pressures of hydrocarbons in the reservoir system were measured.

Keywords:

phase diagrams, PVT studies, condensation pressure prediction, development indicators, and gas condensate system.

For citation:

Dobrolyubova RK, Inyakina EI, Krasnov II. Some features of the properties of reservoir hydrocarbon systems in the development of gas-condensate deposits. Science. Innovations. Technologies. 2026;(2):113-148. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.6>

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

The article was submitted 28.03.2026;
approved after reviewing 08.05.2026;
accepted for publication 10.06.2026.

Введение

Для обоснованного прогноза показателей разработки залежи и своевременного принятия технологических решений в ходе ее эксплуатации необходимы данные о свойствах и составе пластовых флюидов в процессе разработки месторождения. На основе экспериментальных измерений пластовой системы залежей Самбургского месторождения выявлено, что содержание конденсата составляет от $70,5 \text{ см}^3/\text{м}^3$ до $150,9 \text{ см}^3/\text{м}^3$ газа сепарации [1, 2, 3].

В работе установлено, что для получения положительного результата с точностью порядка $\pm 3\div 5\%$ в процессе проведения исследований соблюдались такие условия, как: производительность промыслового сепаратора, должна обеспечивать унос капельной жидкости в составе пластовой смеси не более $4 \text{ см}^3/\text{м}^3$. Давление сепарации находилось в пределах от 2,60 до 4,30 МПа. На основании интегральных замеров при отборе сепарационных проб определялась величина конденсато-газового фактора (КГФ) и физико-химическая характеристика конденсата (плотность, динамическая вязкость и другие свойства) [4, 5]. Полученные данные о компонентном составе флюидов на текущий момент использовались в композиционной PVT-модели при построении диаграмм фазовых превращений. Данная особенность учитывается с целью получения корректных параметров для прогнозирования разработки месторождения.

Обозначенная проблема актуальна в связи с необходимостью выработки запасов, содержащих в составе добываемого газа неуглеводородных компонентов. Для классических газоконденсатных систем стандартные методы построения диаграмм зависимости объема выпавшего конденсата от изменения давления делаются малоэффективными, так как не учитывают реальные пластовые потери, связанные с ростом парциального давления. Построение фазовых диаграмм в широком диапазоне значений позволяет определять условия перехода парогазовой фазы в жидкое состояние с высокой точностью [6, 7]. Так на основании проведенных опытов определено текущее значение конденсатоотдачи, с учетом влияния неуглеводородных компонентов. В рамках работы по результатам исследований выявлено, что происходит влияние на парциальное давление компонентов, находящихся в составе пластового газа изучаемой пластовой смеси [8–10].

Материалы и методы исследований

В процессе проведения промысловых газоконденсатных исследований анализировались пробы газа и конденсата для изучения термодинамических и физико-химических свойств. В лабораторных условиях исследовано более 60% представительных образцов пластового флюида. Отбор проб газа, насыщенного конденсата, а также их исследования выполнялись согласно методическим руководствам ООО «Газпром ВНИИГАЗ». На основе общепринятой фазовой диаграммы (P - T) зависимости давления от температуры определялись термодинамические переходы углеводородной системы из парогазового состояния в жидкое и обратно в газовое. Данная диаграмма создавалась по результатам PVT -опытов методом контактной конденсации на установке «Chandler Engineering-3000G». Диаграмма фазовых состояний по результатам термодинамических опытов имеет петлеобразный характер линий точек конденсации и ретроградного испарения. Она показывает критические точки, где исчезает различие между жидким и парогазовым состоянием [11, 12].

Области ретроградных процессов (наличие зоны конденсации и испарения) определяют крикондебары и крикондетермы. На основании экспериментальных данных, полученных методом дифференциальной конденсации (модель процесса разработки месторождения на истощение), построены графические зависимости потерь углеводородов от изотермического снижения давления при постоянном объеме системы. Результаты изучаемой многокомпонентной системы позволяют определить величину конечной конденсатотдачи и потери конденсата в залежи [13–14].

Результаты исследований и их обсуждение

С целью обоснования и прогноза показателей разработки газоконденсатных залежей была выполнена оценка газодинамических параметров. Прогнозирование параметров проводилось в интервале вскрытия залежи от 2981 до 3798 метров. В процессе промысловых исследований, отбирались сепарационные пробы из газоконденсатных скважин. Давление сепарации поддерживалось в пределах от 2,60 до 4,30 МПа, температура сепарации устанавливалась в пределах от минус 2 °С до 25 °С. В среднем дебит

газа сепарации изменялся от 25 до 358 тыс. м³/сут, дебит стабильного конденсата составил от 1,6 до 137,5 м³/сут. Содержание стабильного конденсата составило от 70,5 см³/м³ до 150,9 см³/м³ газа сепарации. При изучении залежи в интервале вскрытия пласта 3100–3103 метров дебит газа сепарации изменялся от 45 до 63,4 тыс. м³/сут, дебит стабильного конденсата – от 14,1 м³/сут до 39,9 м³/сут. На режиме (штуцер 10 мм и диафрагме 14,7 мм) дебит газа сепарации составил 79,9 тыс. м³/сут, выход насыщенного конденсата (КГФ) составил 227 см³/м³. Промысловые газоконденсатные исследования реализованные в интервале 3159–3165 и 3159–3165, совместно с 3162–3172 метров определили, что дебит сепарированного газа варьировался в пределах от 20,1 до 180,3 тыс. м³/сут, дебит стабильного конденсата – 10,8–35,3 м³/сут, его конденсато-газовый фактор (КГФ) составил – от 120,3 до 289 см³/м³. Выполнены исследования в интервалах (3224–3230 м), (3222–3227 м) и 3227–3234, совместно с 3235–3240 метров показали, что дебит газа после сепаратора изменялся от 110,1 до 223,7 тыс. м³/сут, дебит насыщенного конденсата составил в пределах 60,9–94,8 м³/сут. Выход насыщенного конденсата варьировал от 330 до 432,5 см³/м³. Оценка газоконденсатности, выполненная в интервалах (3209–3218 м), (3187–3194 м), (3204–3207 м) и (3196–3203, 3204–3212 м) показала, что дебит сепарированного газа изменялся от 65 до 334,9 тыс. м³/сут, дебит конденсата составил от 13,4 м³/сут до 190,5 м³/сут.

Выполненный анализ газоконденсатных исследований, позволяет отметить, что по продуктивности можно условно разделить скважины на низко- (до 100 тыс. м³/сут) и среднедебитные (от 100 до 300 тыс. м³/сут). Низкодебитные притоки в общем числе исследованных интервалов составляют около половины (47,8 %), на них приходится основной объем осложнений в виде гидратообразования. Выход насыщенного конденсата (КГФ) в процессе мероприятий изменялся в широком диапазоне – от 61 до 513,2 г/м³ газа сепарации, что обусловлено несколькими факторами. К основным факторам следует отнести значительное снижение забойного давления, приводящее к формированию в прискважинном пространстве депрессионных воронок, притоки с двухфазной углеводородной системой и другие.

Изменение газоконденсатных характеристик прослеживается при снижении пластового давления с 29,89 до 26,33 МПа. Одновременно произошло уменьшение выхода насыщенного конденсата (КГФ) – с 164,7 до 123,6 см³/м³. В весовом выражении выход стабильной углеводородной фазы снизился от 104,2 до 87 г/м³ газа сепарации. Производительность скважин по газу сепарации в среднем составила 169,7–243,4 тыс. м³/сут при пластовом давлении 28,64 МПа. На режиме исследования 8,0 мм, выход насыщенного конденсата составил 33,1–41,9 см³/м³. Совместное исследование интервалов вскрытия пласта проведено не режиме с использованием штуцера диаметром до 9,0 мм. Средний дебит газа сепарации составил 110,9 тыс. м³/сут, дебит стабильного конденсата изменялся от 14,72 до 22,51 м³/сут; дебит воды – 2,45 м³/сут. Содержание стабильного конденсата в среднем составило 136,7 см³/м³ газа сепарации. В процессе исследований отбирался комплекс проб пластовых флюидов. По-видимому, за счет некачественных отборов проб давление варьировалось от 28,5 до 24,6 МПа, что ниже начального пластового давления, коэффициент усадки занижен и составил от 0,780 до 0,886. Часть скважин исследовалась с помощью сепарационной установки ПКИОС, сепарация проводилась в две ступени. Низкий дебит газа сепарации составил 33,6–38,5 тыс. м³/сут, при выходе насыщенного конденсата 302,2–346,5 см³/м³. Полный комплект отбора проб углеводородов (газа сепарации, насыщенного и стабильного конденсата), осуществлялся на 15 различных режимах исследования скважин. При исследовании скважины № 402 отобраны пробы газоконденсатной смеси на режиме со штуцером диаметром 10,7 мм. При этом депрессия на пласт составила 15,7%, скорость потока у «башмака» лифтовых колонн – 1,7 м/с. В среднем пластовая депрессия на режимах отбора проб изменялась в интервале от 1,6 % до 43,4 %, скорость потока у «башмака» насосно-компрессорных труб (НКТ) составляла от 0,9 до 3,0 м/сек.

По оценке результатов исследований пластов БУ10-БУ14 выявлено, что в течение последних трех лет произошло снижение дебита газа сепарации по различным скважинам с 209,5 до 76,3 тыс. м³/сут. При этом выход насыщенного конденсата (КГФ) уменьшился незначительно: с 358,7 до 337,9 см³/м³. Анализ позволяет отме-

тить различия в характеристиках, которые необходимо учитывать при составлении проектных документов: для части газоконденсатных объектов БУ, одновременно со снижением пластового давления (которое за период эксплуатации по некоторым залежам снизилось до 10 % от первоначальной величины) произошло уменьшение коэффициента продуктивности скважин по газу и снижение содержания в нем конденсата (рис.1).

На основании данным лабораторных исследований физико-химических свойств, отобранных проб из разведочных и эксплуатационных скважин, дренирующих пласт (БУ) отмечается, что в начальном составе пластового газа концентрация метана изменяется от 79,74 до 91,50 % мольных. Сумма головных углеводородов ($C_2 + C_3 + C_4$) в пределах от 93,59 до 192,62 % мольных, неуглеводородных компонентов – от 0,51 до 5,47 % мольных. Относительная плотность пластового газа варьирует от 0,6452 до 0,8692. В составе пластового газа, отобранного в начальный период разработки месторождения, концентрация метана изменяется от 79,50 до 3,23 % мольных, сумма головных углеводородов – от 75,21 до 271,29 % мольных, неуглеводородных компонентов составила от 0,31 до 3,16 % мольных, плотность пластового газа изменяется от 0,6290 до 0,885. Содержание метана в текущих составах газа изменяется от 81,17 до 85,70 суммарное содержание этана, пропана, бутанов – от 9,81 до 12,27, неуглеводородных компонентов – от 0,86 до 1,92 % мольных, плотность пластового газа по воздуху варьирует от 0,758 до 0,849. Текущее значение потенциальное содержание конденсата в пробах составило 85,3–94,8 г/м³. Содержание метана в составах газа глубинных проб изменяется от 90,58 до 82,19 % мольных, суммарное содержание этана, пропана, бутанов – от 7,33 до 11,54, неуглеводородных компонентов – от 0,62 до 1,93 % мольных. Концентрация конденсата в пластовом газе изменяется от 2,82 до 7,06 % мольных, плотность пластового газа по воздуху варьирует от 0,64 до 0,83. Содержание метана в кондиционных пробах газа, отобранных на устье разведочных скважин, (содержащих азота не более 3 %) изменяется от 74,39 до 91,39, сумма его гомологов – от 7,03 до 19,93, неуглеводородных компонентов – от 2,31 до 4,10 % мольных. Содержание в газе конденсата изменяется от 0,26

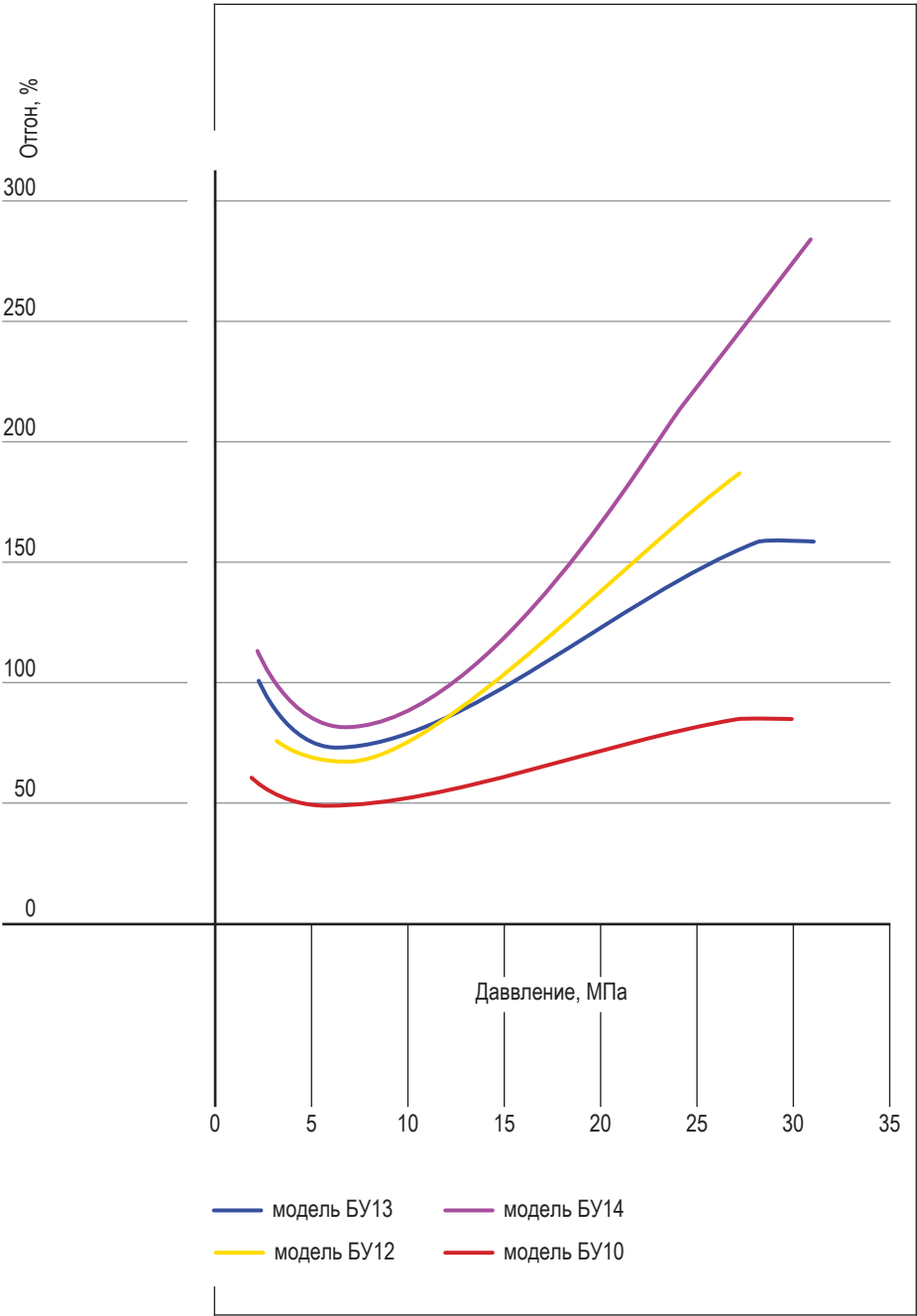


Рис. 1.

Изотерма дифференциальной конденсации пластовой смеси.

Fig. 1. Isotherm of differential condensation of formation mixture.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

до 4,29 % мольных, плотность устьевого газа по воздуху варьирует от 0,64 до 0,868.

Исследование физико-химических свойства стабильного (дегазированного) конденсата, проведены по более 40 проб, отобранных на начальной стадии разработки залежи. По лабораторным данным плотность конденсата изменяется в пределах от 0,760 до 0,818 г/см³. Молекулярная масса конденсата в интервале от 96 до 170. Плотность стабильного конденсата, отобранного из скважин в течение последних трех лет изменилась от 0,733 до 0,769 г/см³, молекулярная масса изменяется от 102 до 115.

Модели пластовых флюидов пластов группы БУ Самбургского месторождения созданы на основе лабораторных исследований глубинных и поверхностных проб газа сепарации и конденсата. Результаты лабораторных исследований собраны в единый массив данных, на основании которого в программе PVTsim была сделана настройка уравнения состояния. Уравнение Пенга-Робинсона с поправкой Пенелюкса использовалась для описания газоконденсатных систем. На рисунках 2–5 представлены принятые при моделировании зависимости конденсатосодержания, вязкости и объемного коэффициента газа от давления.

Исследование фракционного состава стабильного конденсата проводилось на высокотемпературном фракционном дистилляторе. В гидравлических симуляторах предусмотрены процедуры, в которых различаются критические параметры псевдокомпонентов. Однако при небольшом количестве исследований физико-химических свойств флюидов расчетные значения критических параметров псевдокомпонентов после настройки на PVT-эксперименты могут существенно различаться для потоков флюидов из различных пластов. Процедуры смешивания в PVT-симуляторах, основанные на усреднении параметров идентичных компонент, могут привести к критическим отклонениям результирующих физико-химических свойств смесей от наблюдаемых значений. Разбиение углеводородного остатка в составе пластового газа должно быть выполнено по одному из вариантов: использование результатов вакуумной разгонки по ИТК (остаток C_{5+ВЫСШ.} разбивается на узкие фракции согласно результатам фракционной разгонки, имеются свойства узких фрак-

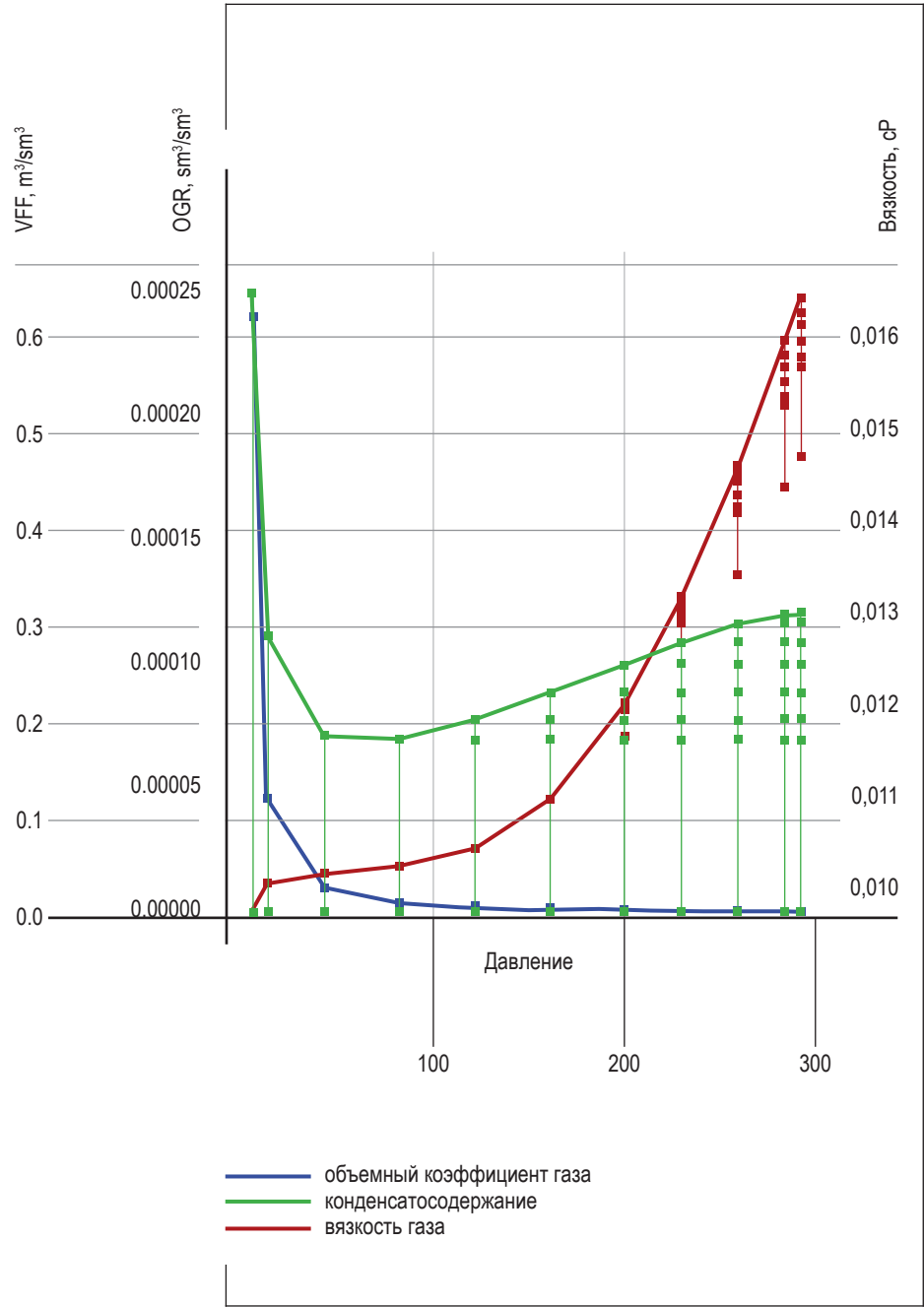


Рис. 2. Зависимости конденсатосодержания, вязкости и объемного коэффициента газа от давления пласта БУ₁₀.
Fig.2. Dependences of condensate content, viscosity and volume coefficient of gas on pressure layer BU₁₀.
Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

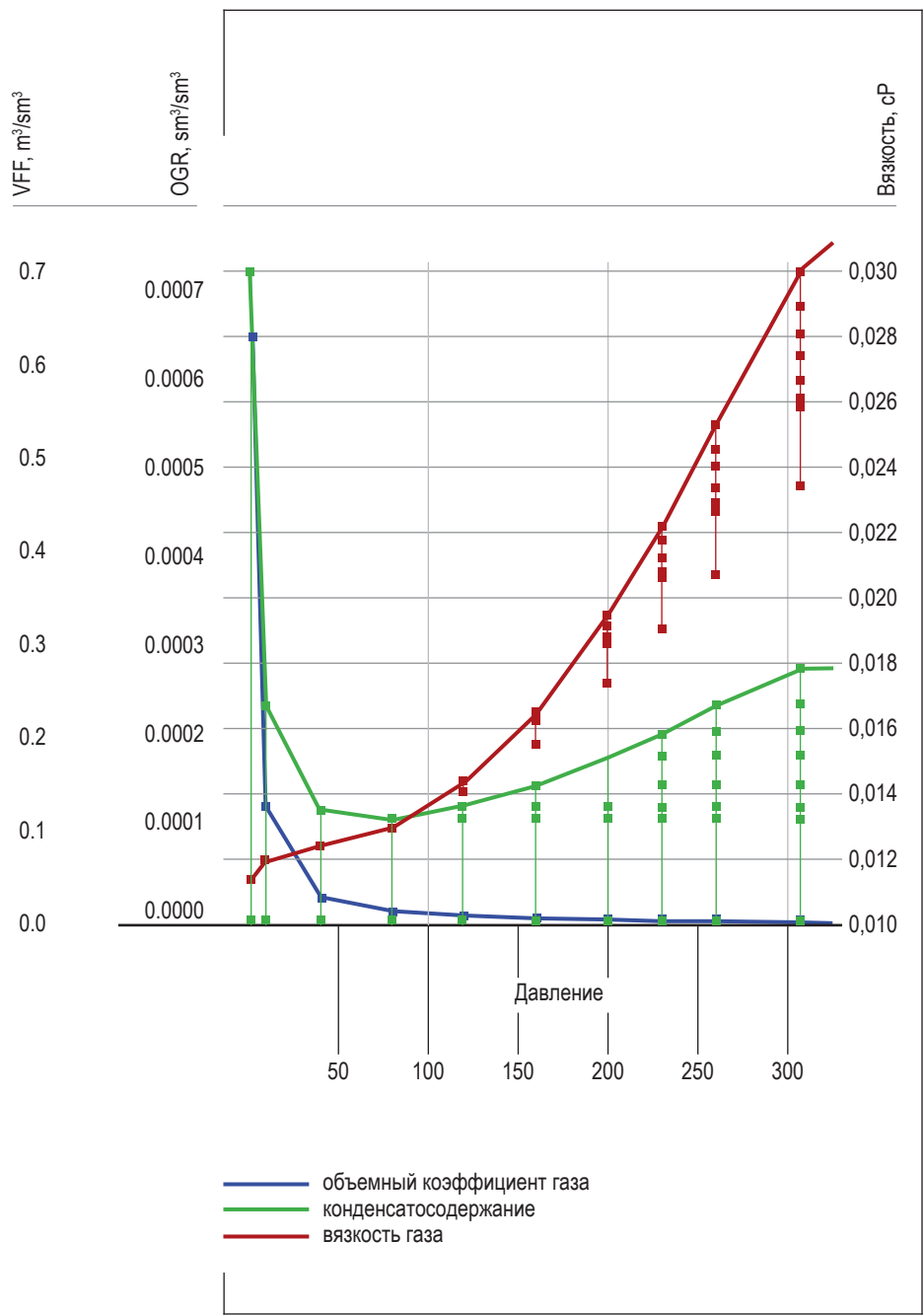


Рис. 3. Зависимости конденсатосодержания, вязкости и объемного коэффициента газа от давления по пласту БУ₁₂.
Fig. 3. Dependences of condensate content, viscosity and volume coefficient of gas on pressure layer BU₁₂.

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

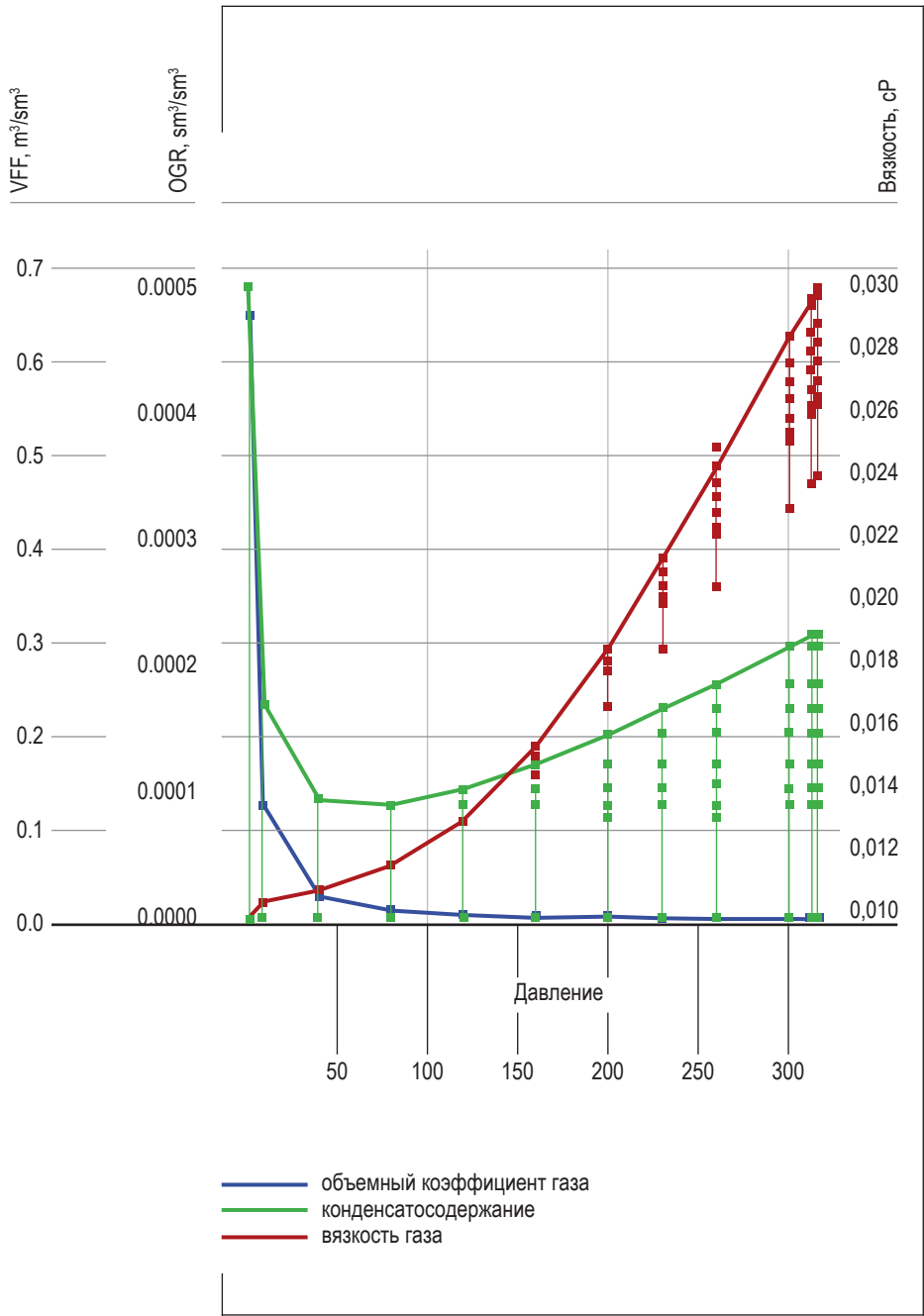


Рис. 4. Динамика конденсатосодержания, вязкости и объемного коэффициента газа от давления по пласту БУ₁₃.
Fig. 4. Dependences of condensate content, viscosity and volume coefficient of gas on pressure layer BU₁₃.
Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

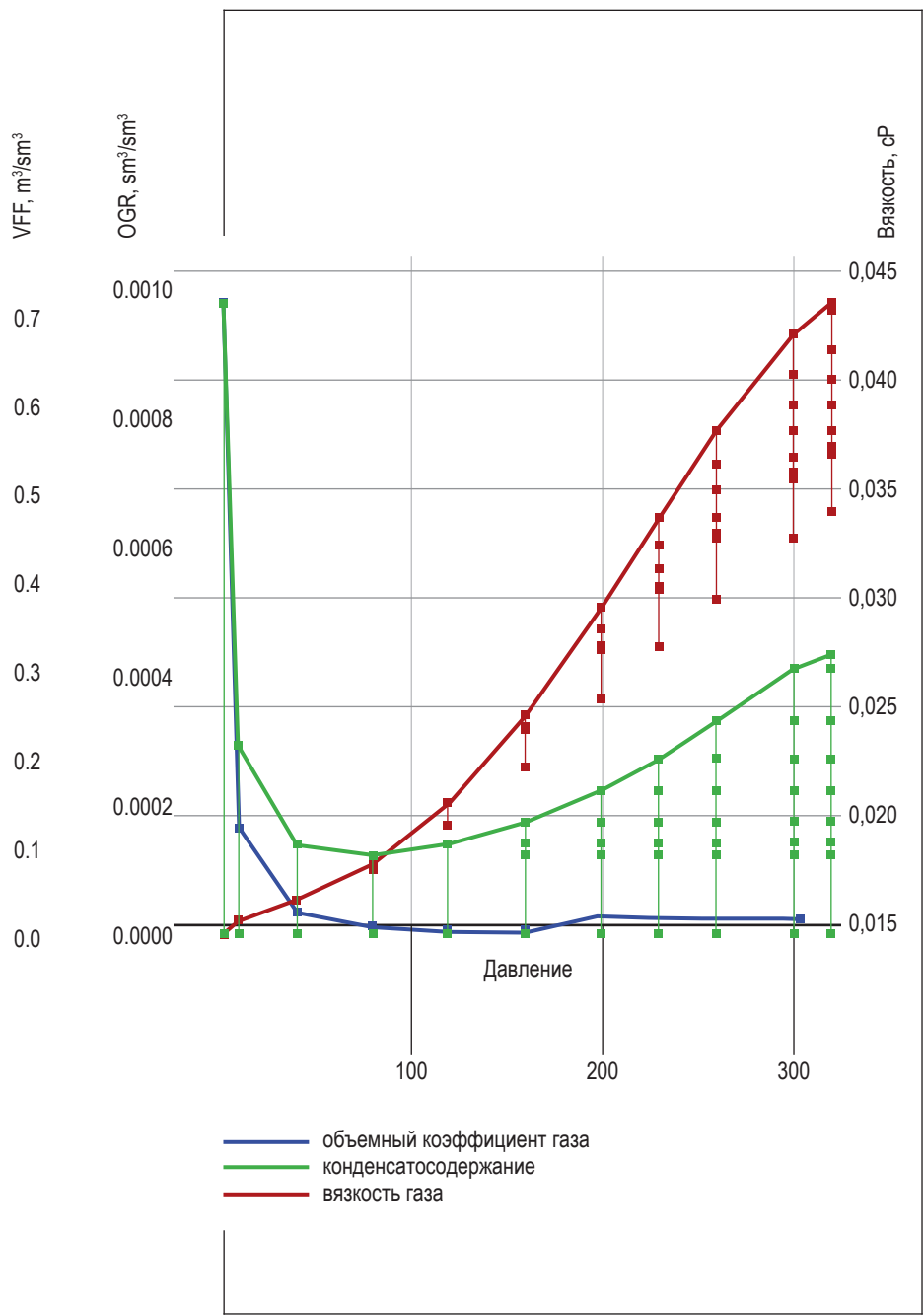


Рис. 5. Зависимости конденсатосодержания, вязкости и объемно-го коэффициента газа от давления по пласту БУ₁₄.
Fig. 5. Dependences of condensate content, viscosity and volume coefficient of gas on pressure layer BU₁₄.
Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

ций); использование результатов фракционной разгонки по Энглеру; использование результатов хроматографии (фракции ранжируются по номеру нормального парафина, свойства фракций определены по корреляциям); разбиение остатка по методу Whitson при отсутствии результатов хроматографии и фракционной разгонки. В результате исследования определялись общая физико-химическая характеристика конденсата (плотность, показатель преломления, вязкость и другие). Данные атмосферной разгонки стабильного и дебутанизированного конденсата по Энглеру приведены в таблице 1.

Таблица 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА КОНДЕНСАТА
Table 1. Results of the study of the fractional composition of condensate

Фракционный состав конденсата			
Параметр	Метод исследования	Температура разгонки	Результаты разгонки
Фракционный состав НК	ГОСТ 2177-99 (метод Б)	°C	46
10 % об.			76
20 % об.			91
30 % об.			102
40 % об.			112
50 % об.			122
60 % об.			135
70 % об.			154
80 % об.			180
90 % об.			224
97 % об.			264
КК			275
остаток		% об.	1,0
остаток + потери		% об.	1,5
выход		% об.	98,5
Удельная теплота сгорания	ГОСТ 22667-82	кКал/кг	11 580

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

Перед началом лабораторных исследований проба конденсата стабилизировалась в жидкостном термостате при температуре $+20^{\circ}\text{C}$. Стабильный конденсат имеет плотность $735,3 \text{ кг/м}^3$, вязкость кинематическая при температуре 20°C – $0,802 \text{ мм}^2/\text{с}$, молекулярную массу 101. Основная часть газоконденсата 70% (об.) отгоняется до температуры 154°C , остальные 28% (об.) отгоняются до температуры 275°C . Температура застывания газоконденсата ниже минус 60°C , содержание твердых парафинов в составе газоконденсата – 0,02% (масс.). На основании полученных данных построена кривая, характеризующая изменение температуры от объёмного процента отгона пробы, представленная на рисунке 6.

Данные исследований компонентного состава газа сепарации, газа дегазации, газа дебутанизации и дебутанизованного конденсата, определенные хроматографическим методом, использовались для расчетов псевдо-критических параметров ($R_{кр.}$, $T_{кр.}$) газа сепарации, состава пластового газа и потенциального содержания конденсата в газе сепарации. Метод основан на количественном определении индивидуальных углеводородов на газовом хроматографе Agilent Technologies 6890N, оснащённом пламенно-ионизационным детектором и капиллярной колонкой. Определение неуглеводородных компонентов (N_2 , CO_2) проводилось с использованием насадочных колонок и термо-кондуктивного детектора. Компонентный углеводородный состав дебутанизованного газоконденсата был определен методом газоадсорбционной хроматографии. По данным проведенных исследований пластового газа и дебутанизованного конденсата определены их основные характеристики, которые приведены в таблицах 2–4.

Процесс адаптации гидродинамической модели включал: сбор промысловых данных (устьевые и забойные давления и интервалы перфораций) и лабораторные результаты.

Контроль адаптации осуществлялся по текущему давлению, а также по составу пластового флюида. Динамика потерь углеводородов и конденсатоотдача в залежи нелинейно снижается со временем. Результаты определения потерь конденсата при снижении давления приведены в таблицах 5–6 и на рисунке 9.

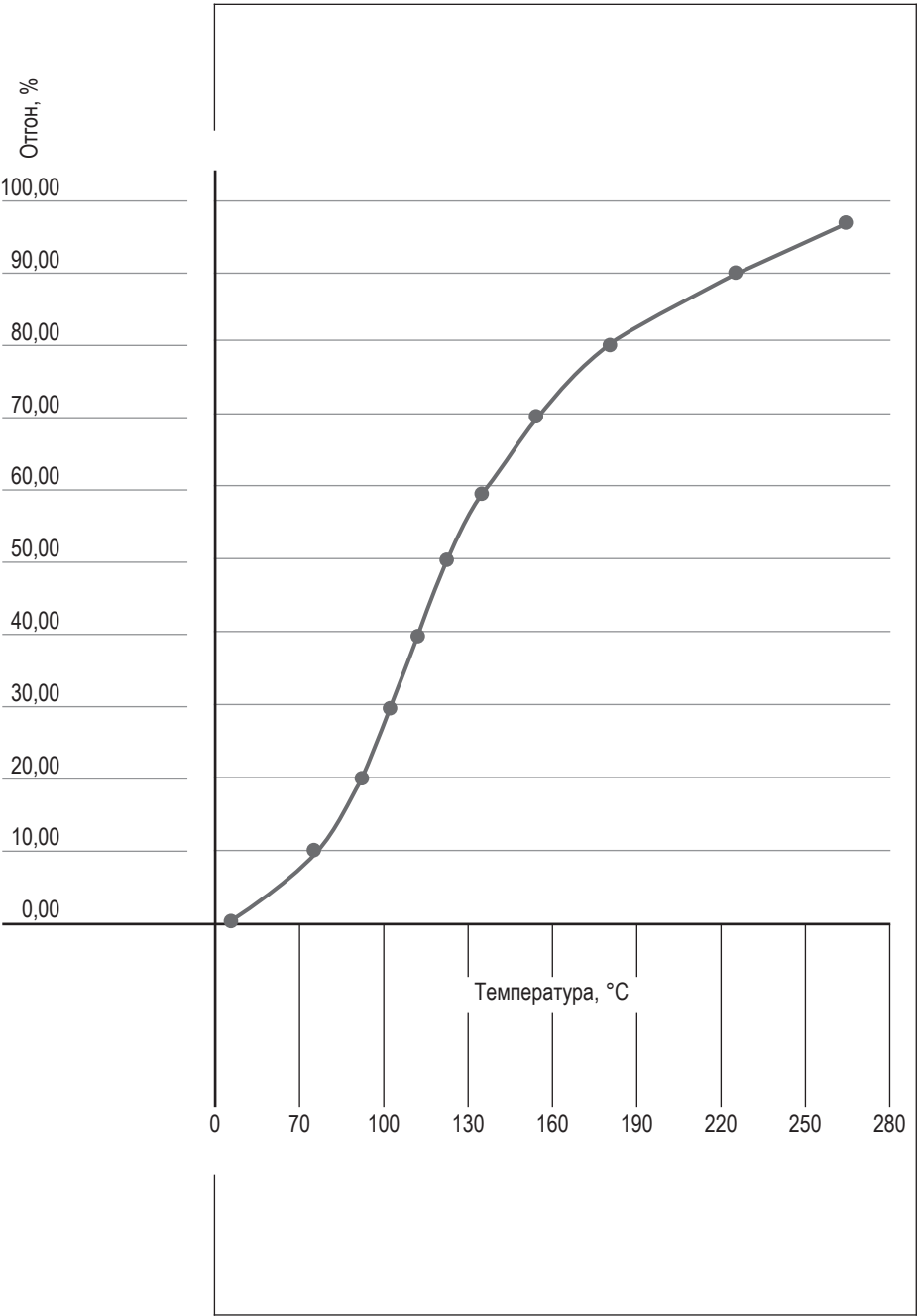


Рис. 6. График зависимости отгона фракций конденсата от температуры.
Fig. 6. Graph of the dependence of the distillation of condensate fractions on temperature.
Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

Таблица 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА
ГАЗА ДЕГАЗАЦИИ
Table 2. Results of studies of the component composition
of degassing gas reduction

Скважина		Номер 173	
Наименование компонента		Содержание	
		мольн., %	масс., %
Диоксид углерода	CO ₂	0,117	0,188
Метан	CH ₄	51,738	30,336
Этан	C ₂ H ₆	22,482	24,707
Пропан	C ₃ H ₈	19,713	31,770
Изо-бутан	i-C ₄ H ₁₀	3,027	6,430
Бутан	n-C ₄ H ₁₀	2,271	4,824
Изо-пентан	i-C ₅ H ₁₂	0,424	1,118
Пентан	n-C ₅ H ₁₂	0,181	0,477
Изо-гексан	i-C ₆ H ₁₄	0,037	0,177
Гексан	n-C ₆ H ₁₄	0,008	0,025
Изо-гептан	i-C ₇ H ₁₆	0,002	0,007
Гептан	n-C ₇ H ₁₆	0,000	0,000
Изо-октан	i-C ₈ H ₁₈	0,000	0,000
Октан	n-C ₈ H ₁₈	0,000	0,000
Изо-нонан	i-C ₉ H ₂₀	не обн.	не обн.
Нонан	n-C ₉ H ₂₀	не обн.	не обн.
Изо-декан	i-C ₁₀ H ₂₂	не обн.	не обн.
Декан	n-C ₁₀ H ₂₂	не обн.	не обн.
Изо-ундекан	i-C ₁₁ H ₂₄	не обн.	не обн.
Ундекан	n-C ₁₁ H ₂₄	не обн.	не обн.
Изо-додекан	i-C ₁₂ H ₂₆	не обн.	не обн.
Додекан	n-C ₁₂ H ₂₆	не обн.	не обн.
Сумма		100,00	100,00
Молекулярная масса газа, кг/кмоль		27,3617	
Плотность газа, кг/м ³		1,1382	
Теплота сгорания 1 м ³ газа, кКал/м ³ :			
низшая		13261	
высшая		14535	

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

Таблица 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА
ГАЗА ДЕБУТАНИЗАЦИИ
Table 3. Results of studies of the component composition
of debutanization gas

Месторождение Скважина		Номер 173	
Наименование компонента		Содержание	
		мольн., %	масс., %
Диоксид углерода	CO ₂	0,531	0,419
Метан	CH ₄	0,198	0,057
Этан	C ₂ H ₆	1,826	0,984
Пропан	C ₃ H ₈	22,843	18,047
Изо-бутан	i-C ₄ H ₁₀	27,926	29,081
Бутан	n-C ₄ H ₁₀	35,916	37,402
Изо-пентан	i-C ₅ H ₁₂	9,014	11,652
Пентан	n-C ₅ H ₁₂	1,353	1,749
Изо-гексан	i-C ₆ H ₁₄	0,353	0,545
Гексан	n-C ₆ H ₁₄	0,031	0,048
Изо-гептан	i-C ₇ H ₁₆	0,006	0,011
Гептан	n-C ₇ H ₁₆	0,003	0,005
Изо-октан	i-C ₈ H ₁₈	0,000	0,000
Октан	n-C ₈ H ₁₈	0,000	0,000
Изо-нонан	i-C ₉ H ₂₀	не обн.	не обн.
Нонан	n-C ₉ H ₂₀	не обн.	не обн.
Изо-декан	i-C ₁₀ H ₂₂	не обн.	не обн.
Декан	n-C ₁₀ H ₂₂	не обн.	не обн.
Изо-ундекан	i-C ₁₁ H ₂₄	не обн.	не обн.
Ундекан	n-C ₁₁ H ₂₄	не обн.	не обн.
Изо-додекан	i-C ₁₂ H ₂₆	не обн.	не обн.
Додекан	n-C ₁₂ H ₂₆	не обн.	не обн.
Сумма		100,00	100,00
Молекулярная масса газа, кг/кмоль			55,8150
Плотность газа, кг/нм ³			2,3218

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

Таблица 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА
ДЕБУТАНИЗИРОВАННОГО КОНДЕНСАТА
Table 4. Results of studies on the component composition of debutanized
condensate

Скважина		Номер 173	
Наименование компонента		Содержание	
		мольн., %	масс., %
Метан	CH ₄	-164,0	Не обн.
Этан	C ₂ H ₆	-88,6	0,001
Пропан	C ₃ H ₈	-42,1	0,042
Изо-Бутан	C ₄ H ₁₀	-0,5	0,209
Н-Бутан	C ₄ H ₁₀	-0,5	0,736
Изо-Пентан	C ₅ H ₁₂	36,1	1,932
Н-Пентан	C ₅ H ₁₂	36,1	2,826
Изо-Гексан	C ₆ H ₁₄	68,7	3,224
Н-Гексан	C ₆ H ₁₄	68,7	1,376
Изо-Гептан	C ₇ H ₁₆	98,4	13,003
Н-Гептан	C ₇ H ₁₆	98,4	3,695
Изо-Октан	C ₈ H ₁₈	124,7	13,225
Н-Октан	C ₈ H ₁₈	124,7	4,149
Изо-Нонан	C ₉ H ₂₀	150,8	8,190
Н-Нонан	C ₉ H ₂₀	150,8	3,876
Деканы	C ₁₀ H ₂₂	174,1	7,923
Ундеканы	C ₁₁ H ₂₄	195,9	6,717
Додеканы	C ₁₂ H ₂₆	216,0	2,353
Тридеканы	C ₁₃ H ₂₈	235,4	2,185
Тетрадеканы	C ₁₄ H ₃₀	253,7	1,300
Пентадеканы	C ₁₅ H ₃₂	270,6	1,434
Гексадеканы	C ₁₆ H ₃₄	286,8	0,952
Гептадеканы	C ₁₇ H ₃₆	302,7	0,657
Октадеканы	C ₁₈ H ₃₈	316,1	0,456
Нонадеканы	C ₁₉ H ₄₀	329,7	0,306
Эйкозаны	C ₂₀ H ₄₂	342,7	0,196
Генэйкозаны	C ₂₁ H ₄₄	358,0	0,133
Докозаны	C ₂₂ H ₄₆	370,0	0,105
Трикозаны	C ₂₃ H ₄₈	383,0	0,089
Тетракозаны	C ₂₄ H ₅₀	395,0	0,085
Пентакозаны	C ₂₅ H ₅₂	406,0	0,074
Гексакозаны	C ₂₆ H ₅₄	417,0	0,062
Гептакозаны	C ₂₇ H ₅₆	427,0	0,062

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

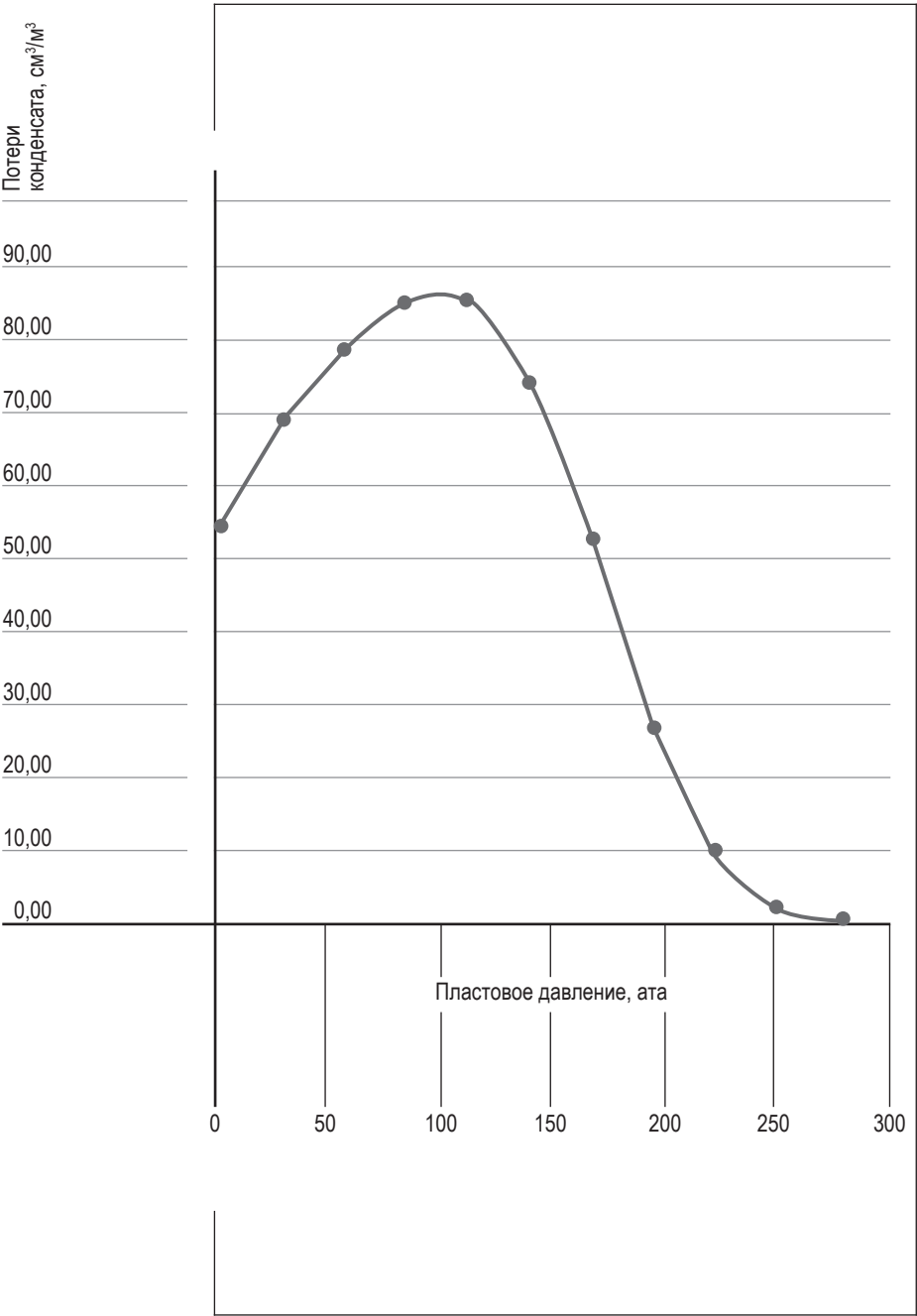


Рис. 7.

Кривая пластовых потерь дифференциальной конденсации.

Fig. 7. Formation loss curve of differential condensation.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

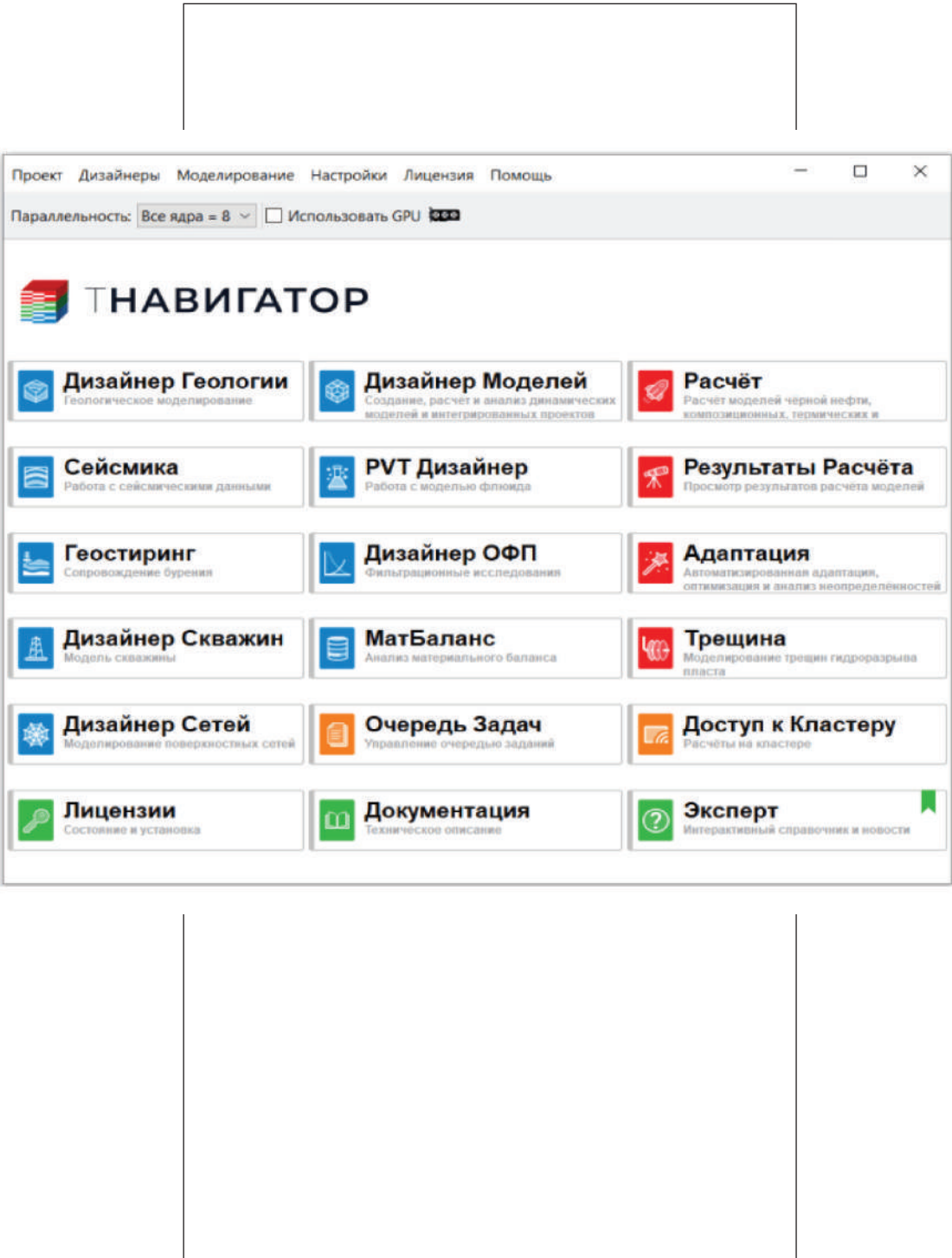


Рис. 8. Интерфейс программного комплекса TНавигатор.
Fig. 8. Interface of the TNavigator software package.

Таблица 5. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕРЬ КОНДЕНСАТА
ПРИ СНИЖЕНИИ ДАВЛЕНИЯ
Table 5. The results of determining condensate losses during pressure
reduction

Наименование показателей	
Пластовое давление, МПа	Содержание конденсата, см ³ /м ³
26	227,50
23	223,98
21	214,93
18	200,57
16	183,53
13	170,79
10	164,34
8	164,76
5	170,12
3	177,38
1	187,45
0	188,46

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

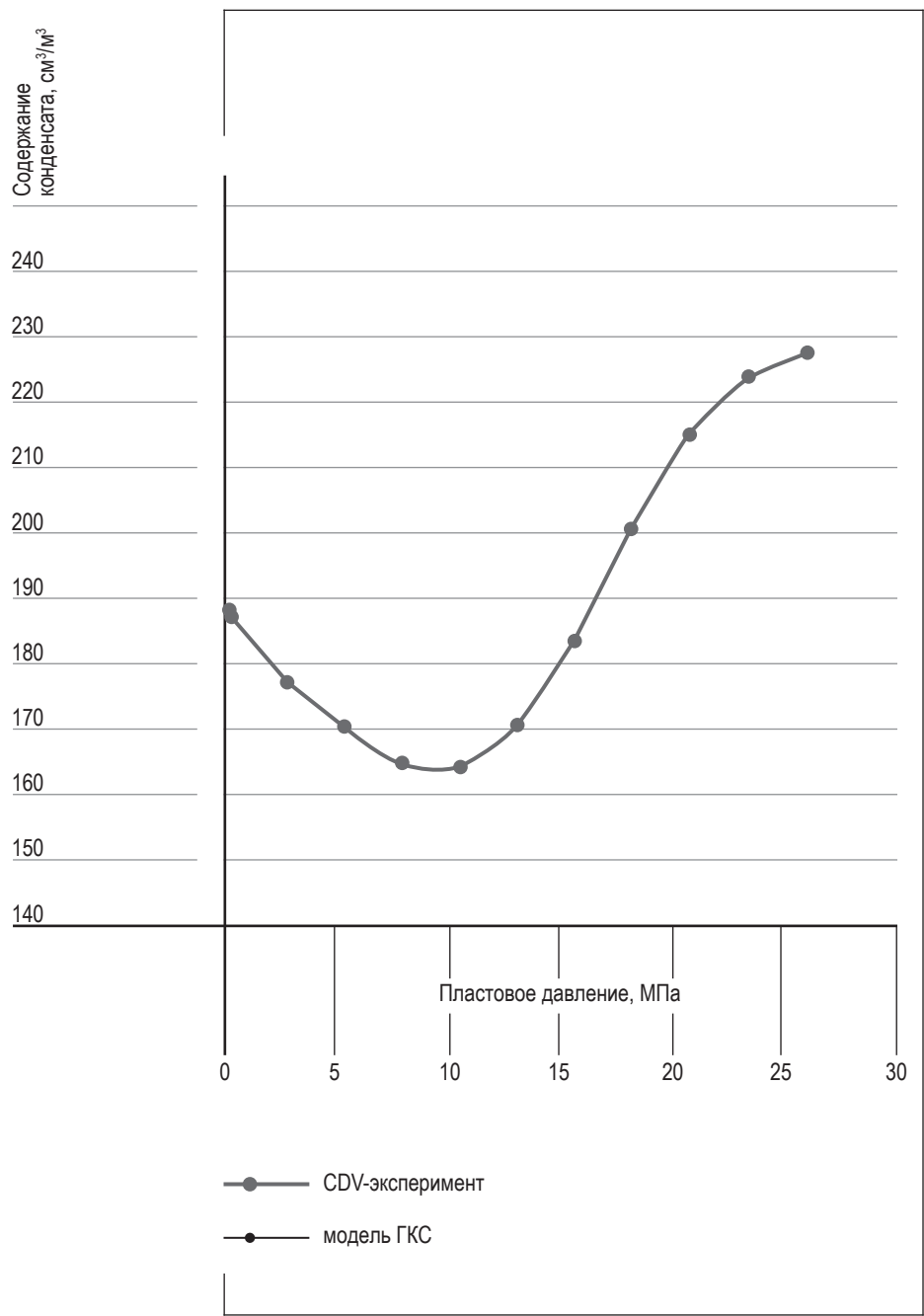


Рис. 9. Изменение состава конденсата в газе до проведения адаптации.

Fig. 9. Changes in the composition of condensate in the gas before adaptation.

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

Таблица 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА ПЛАСТОВОГО ГАЗА
Table 6. Results of determining the composition of reservoir gas

Компоненты	Состав пластового газа	
	Моли	% мол.
CH ₄	891,83	85,51
C ₂ H ₆	72,54	6,96
C ₃ H ₈	36,44	3,49
i-C ₄ H ₁₀	6,95	0,67
n-C ₄ H ₁₀	6,99	0,67
i-C ₅ H ₁₂	2,21	0,21
n-C ₅ H ₁₂	1,92	0,18
C ₆ H ₁₄	3,68	0,35
C ₇ H ₁₆	8,90	0,85
C ₈ H ₁₈	4,81	0,46
C ₉ H ₂₀	3,20	0,31
N ₂	3,12	0,30
CO ₂	0,31	0,03
He	0,09	0,01
Всего	1043	100

Адаптация на результаты газоконденсатных термодинамических исследований приведена на рисунках 10–11.

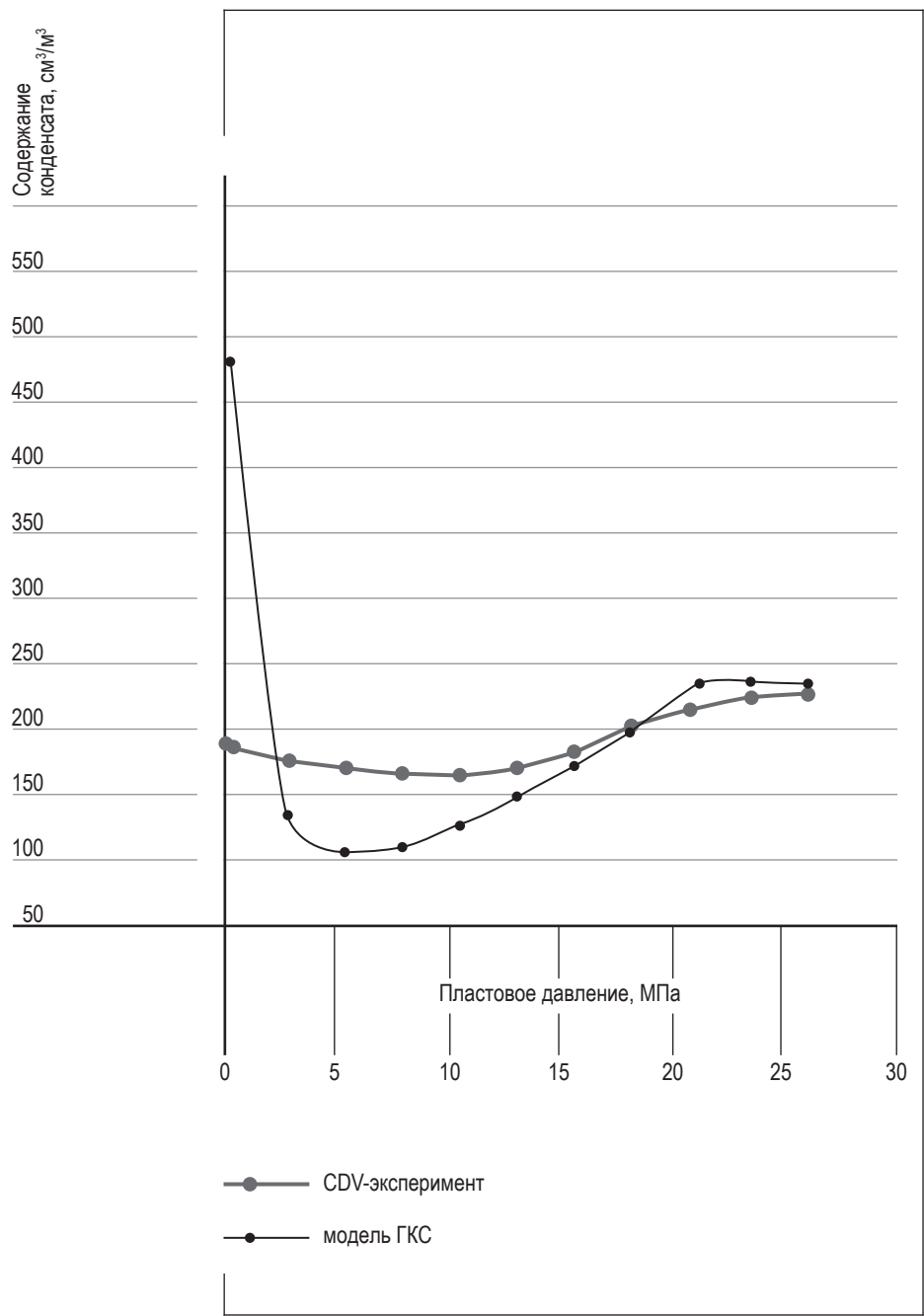


Рис. 10. Изменение состава конденсата в газе после проведения адаптации.
Fig. 10. Change in the composition of condensate in gas after adaptation.
Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

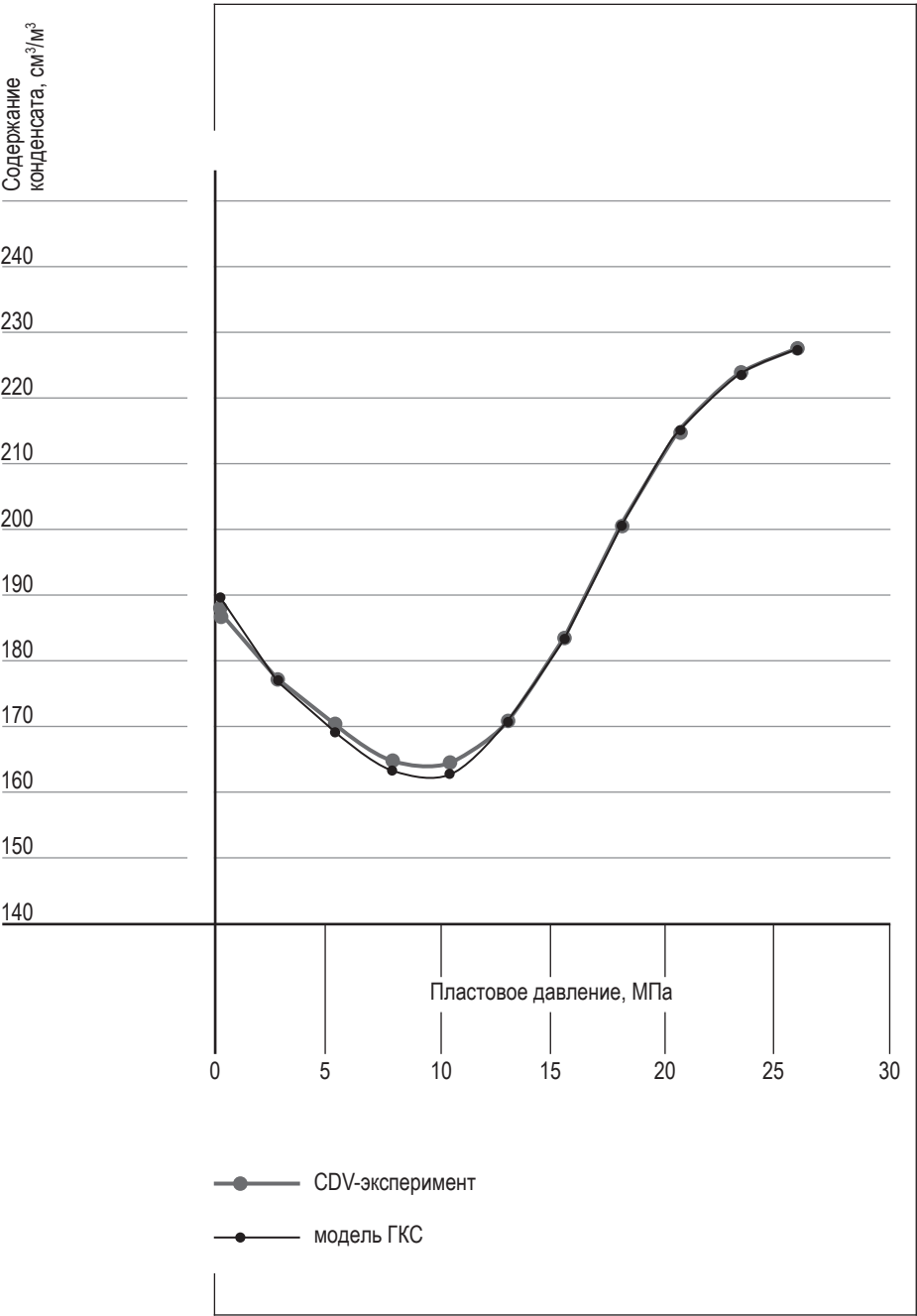


Рис. 11. Изменение состава конденсата в газе после проведения адаптации.
Fig. 11. Change in the composition of condensate in gas after adaptation.
Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

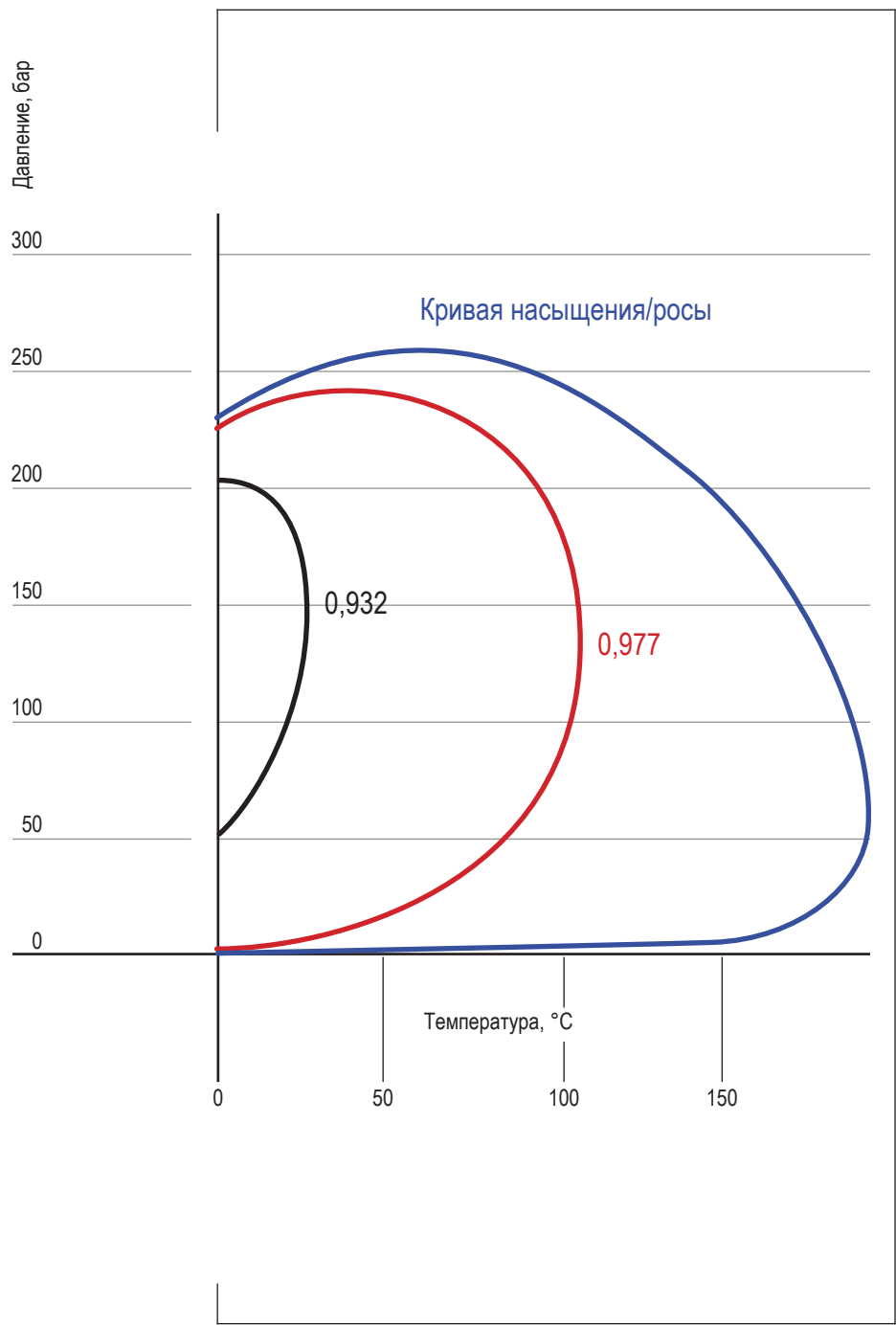


Рис. 12. Фазовая диаграмма газоконденсатной системы.
Fig. 12. Phase diagram of a gas-condensate system.
Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

Фазовая диаграмма PVT-соотношений показывает, что переход из однофазного парогазового состояния в жидкое равно начальному пластовому давлению и составляет 26 МПа (рис. 12).

Перераспределение концентрации между углекислого газа и метаном показано на рисунке 13.

Количество конденсата в добываемом газе в i -го этапа с учетом углекислого газа представлено на рисунке 14.

Таким образом, полученные данные позволяют сделать вывод, что изучаемая пластовая газоконденсатная система по фазовому состоянию является насыщенной. Поэтому давление перехода из однофазного парогазового состояния в жидкое равно начальному пластовому давлению.

С целью изучения термодинамических свойств, отобраны поверхностные и глубинные пробы по результатам процедуры оценки качества. Определение состава пластового газа для каждого режима проводилась на основе проб газа сепарации и насыщенного конденсата. Исследования заключались в определении пластовых потерь конденсата при снижении от начального пластового до атмосферного давления на отобранных рекомбинированных пробах газа сепарации. В экспериментах потери конденсата варьировались в интервале от $227,50 \text{ см}^3/\text{м}^3$ до $325,72 \text{ см}^3/\text{м}^3$ при давлении начала конденсации 26,0 МПа, что соответствует пластовому давлению. Давление максимальной конденсации составило 10,00 МПа, при этом пластовые потери конденсата изменились до $164,34 \text{ см}^3/\text{м}^3$.

В опытах по дифференциальной конденсации с отбором пластового газа идет процесс выпадения жидкой фазы. Затем после давления максимальной конденсации (10,0 МПа) до атмосферного проходит процесс ретроградного испарения. Так, в результате сравнения проведенных экспериментов установлено, что реальное давление максимальной конденсации пластовой системы, определенное на установке *PVT*, находится в интервале от 9,50 МПа до 10,50 МПа, что подтверждено на других рекомбинированных пробах газа сепарации и конденсата.

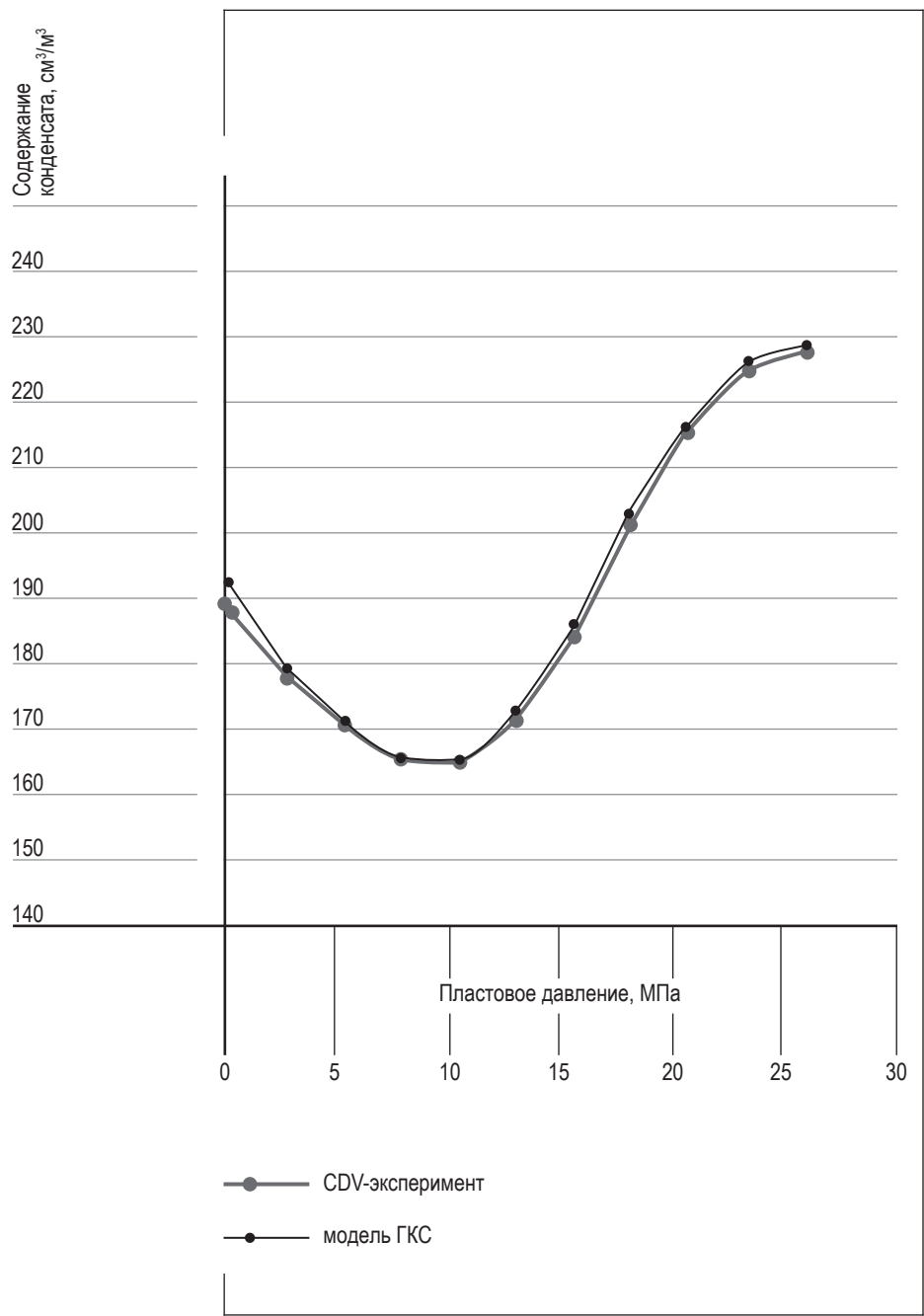


Рис. 13. Перераспределение концентрации (распределение 0,5% мольной доли) между CO₂ и метаном.
Fig. 13. Diagram of redistribution of mole fraction concentration between CO₂ and methane.
Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

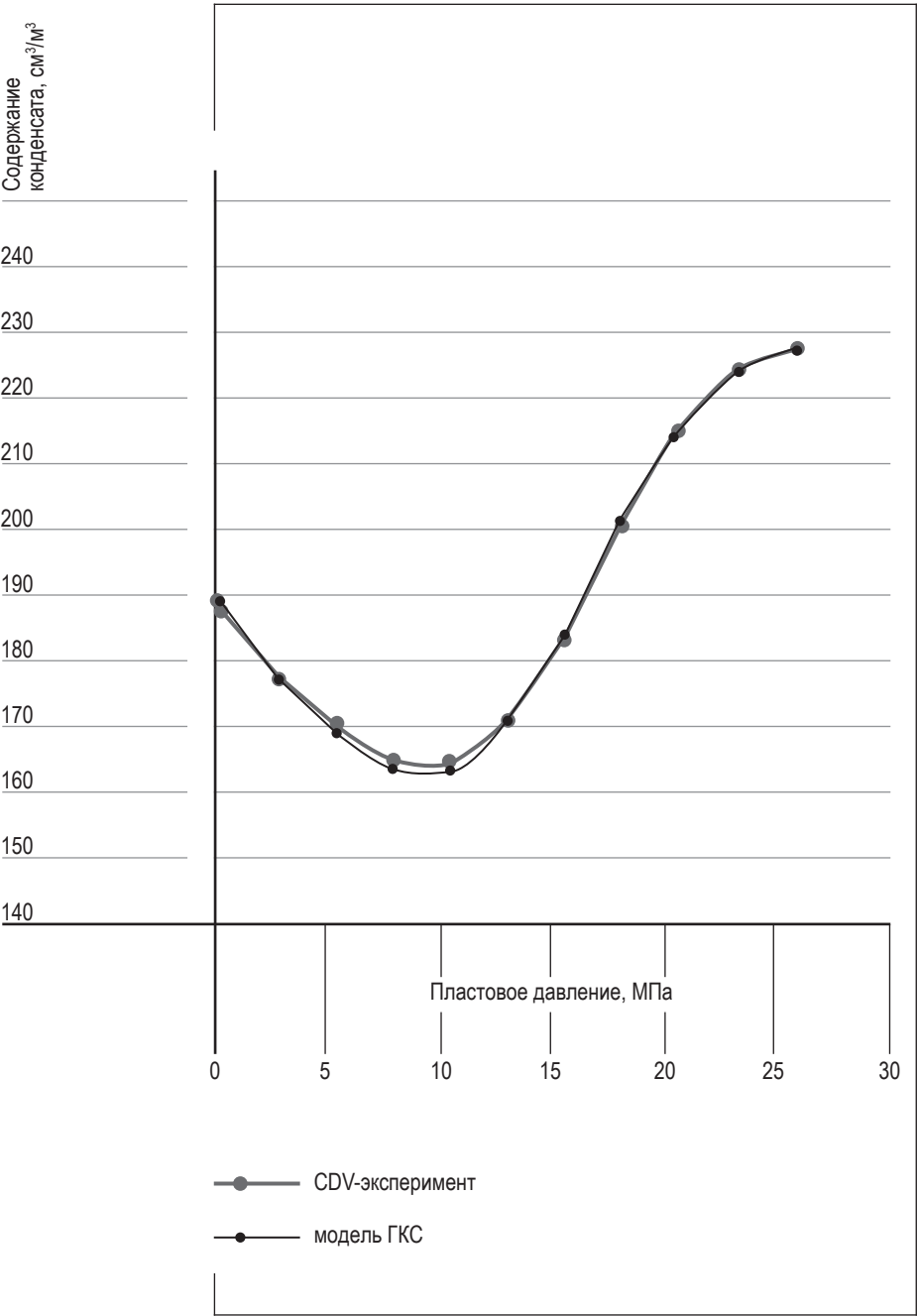


Рис. 14. Изменение содержания конденсата в пластовом газе от давления.
Fig.14. Change in condensate content in reservoir gas depending on pressure.
Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

Заключение

Результаты измерений на установке PVT показали, что фазовое поведение углеводородных смесей существенно меняются. Установлено на основе экспериментальных измерений пластовой системы залежей Самбургского месторождения, что содержание конденсата составляет от $70,5 \text{ см}^3/\text{м}^3$ до $150,9 \text{ см}^3/\text{м}^3$ газа сепарации. Выявлено, что для получения положительного результата с точностью порядка $\pm 3\div 5\%$ в процессе проведения исследований производительность промыслового сепаратора обеспечивала унос капельной жидкости в составе пластовой смеси не более $4 \text{ см}^3/\text{м}^3$. Полученные данные позволяют прогнозировать потери углеводородов в залежи и корректировать динамику текущей конденсатоотдачи при разработке месторождения. В опыте при давлении максимальной конденсации 10,0 МПа пластовые потери конденсата составили $164,34 \text{ см}^3/\text{м}^3$ для углеводородной смеси. Представленные результаты исследований углеводородных флюидов позволяют определить пластовые потери и коэффициент извлечения конденсата. Дополнительно наличие неуглеводородных компонентов (CO_2) в добываемом газе влияет фазовые процессы газоконденсатной системы, повышает конденсацию углеводородов на начальном этапе разработки залежи и снижает в целом конденсатоотдачу. Также необходимо учитывать при проектировании разработки месторождения другие факторы, такие, как наличие конденсационной воды, остаточность нефтенасыщенности, перетоков нефти в газонасыщенную область пласта и др.

Список источников

1. Петренко В. И., Зиновьев В. В., Зленко В. Я. и др. Геолого-геохимические процессы в газоконденсатных месторождениях и ПХГ. Москва: Недра, 2003. 511 с.
2. Гриценко А. И., Гриценко И. А., Юшкин В. В., Островская Т.Д. Научные основы прогноза фазового поведения пластовых газоконденсатных систем. Москва: Недра, 1995. 342 с.
3. Гриценко А. И., Клапчук О. В., Харченко Ю. А. Гидродинамика газожидкостных смесей в скважинах и трубопроводах. Москва: Недра, 1994. 238 с.

4. Александров И. С., Григорьев Б. А. Моделирование термодинамических свойств и фазового поведения углеводородов и сложных углеводородных смесей на основе нового PC-SAFT-уравнения состояния // Вести газовой науки: науч.-техн. сб. Москва: Газпром ВНИИГАЗ, 2018. № 4 (36). С. 237–248.
5. Александров И. С., Григорьев Б. А., Герасимов А. А. Прогнозирование фазового поведения технологических фракций нефти на основе нового PC-SAFT-уравнения состояния с использованием искусственных нейронных сетей // Вести газовой науки: науч.-технический сб. Москва: Газпром ВНИИГАЗ, 2018. № 5 (37). С. 4–11.
6. Гриценко А. И., Гриценко И. А., Юшкин В. В. и др. Научные основы прогноза фазового поведения пластовых газоконденсатных систем. Москва: Недра, 1995. 432 с.
7. Брусиловский А. И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. Москва: Грааль, 2002. 575 с.
8. Гриценко И. Ю., Юшкин В. В. PVT исследования Уренгойского месторождения ачимовская свита // Изучение углеводородных систем сложного состава. Москва: ВНИИГАЗ, 2000. С. 12–15.
9. Zeinalabideen M. J., Al-Hilali M. M., Savinkov A. State of the art of advanced spectral noise and high-precision temperature logging technology utilization in Iraqi oil fields: an integration approach to diagnose wells performance complications // Journal of Petroleum Exploration and Production. 2021. 11(4). P. 1597–1607.
10. Краснова Е. И., Грачев С. И. Результаты исследования фазового поведения углеводородов при наличии пластовой воды в газоконденсатной системе // Академический журнал Западной Сибири. 2012. № 4. С. 10–15.
11. Григорьев Б. А., Ланчаков Г. А., Герасимов А. А. и др. Расчет термодинамических свойств и фазового равновесия газовых конденсатов на основе кубических и многоконстантных уравнений состояния // Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов: сб. науч. ст. в 2 ч. Ч. 2. Москва: Газпром ВНИИГАЗ, 2011. С. 138–149.
12. Добролюбова Р. К., Инякина Е. И., Краснов И. И. Исследование влияние азота на пластовые потери конденсата при

разработке Чаяндинского месторождения // Наука. Инновации. Технологии. 2022. № 3. С. 75–96.

13. Добролюбова Р. К., Инякина Е. И., Краснов И. И., Инякин В. В., Семенов А. Ф. Прогноз потерь углеводородов в залежи при разработке газоконденсатных месторождений // Наука. Инновации. Технологии. 2024. № 4. С. 111–142.
14. Sulaiman I. N., Zeinalabideen M. J., Abed A. A. An improved correlation to investigate the effect of chemical additives on the mobility ratio of two-phase flow // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2021. No. 9(1). P. 227–234.
15. Инякина Е. И., Островская Т. Д. Влияние содержания неуглеводородных компонентов в пластовом газе на конденсатоотдачу // Научный форум. Сибирь. 2022. Т. 8. № 2. С. 26–28.

References

1. Petrenko VI, Zinoviev VV, Zlenko VYa et al. Geological and geochemical processes in gas condensate fields and UGS facilities. Moscow: Nedra; 2003. 511 p. (In Russ.).
2. Gritsenko AI, Gritsenko IA, Yushkin VV, Ostrovskaya TD. Scientific foundations of forecasting the phase behavior of reservoir gas condensate systems. Moscow: Nedra; 1995. 342 p. (In Russ.).
3. Gritsenko AI., Klapchuk OV, Kharchenko YuA. Hydrodynamics of Gas-Liquid Mixtures in Wells and Pipelines. Moscow: Nedra; 1994. 238 p. (In Russ.).
4. Alexandrov IS, Grigoriev BA. Modeling of Thermodynamic Properties and Phase Behavior of Hydrocarbons and Complex Hydrocarbon Mixtures Based on the New PC-SAFT Equation of State. Vesti Gazovoi Nauki: Scientific and Technical Collection. Moscow: Gazprom VNIIGAZ; 2018;4(36): 237-248. (In Russ.).
5. Alexandrov IS, Grigoriev BA, Gerasimov AA. Forecasting the phase behavior of technological fractions of oil based on a new PC-SAFT equation of state using artificial neural networks. Vesti gazovoi nauki: nauch.-technical. sb. Moscow: Gazprom VNIIGAZ; 2018;5(37): 4-11. (In Russ.).
6. Gritsenko AI, Gritsenko IA, Yushkin VV et al. Scientific founda-

- tions of forecasting the phase behavior of reservoir gas condensate systems. Moscow: Nedra; 1995. 432 p. (In Russ.).
7. Brusilovsky AI. Phase Transformations in the Development of Oil and Gas Fields. Moscow: Graal; 2002. 575 p. (In Russ.).
 8. Gritsenko IYu, Yushkin VV. PVT Studies of the Urengoy Field in the Achimov Formation. Study of Complex Hydrocarbon Systems. Moscow: VNIIGAZ; 2000. P. 12–15. (In Russ.).
 9. Zeinalabideen MJ, Al-Hilali MM, Savinkov A. State of the art of advanced spectral noise and high-precision temperature logging technology utilization in Iraqi oil fields: an integration approach to diagnose wells performance complications. *Journal of Petroleum Exploration and Production*. 2021;11(4): 1597-1607.
 10. Krasnova EI, Grachev SI. Results of the study of the phase behavior of hydrocarbons in the presence of formation water in a gas condensate system. *Academic Journal of Western Siberia*. 2012;(4):10–15. (In Russ.).
 11. Grigoryev BA, Lanchakov GA, Gerasimov AA et al. Calculation of thermodynamic properties and phase equilibrium of gas condensates based on cubic and multiconstant equations of state. *Vesti Gazovoy Nauki. Relevant issues of studies of fi eld hydrocarbon formations: collected book in 2 pts*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ LLC; 2011. Pt. 2. P. 138–149. (In Russ.).
 12. Dobrolyubova RK, Inyakina EI, Krasnov II. Study of the Effect of Nitrogen on In-Plant Condensate Losses during the Development of the Chayandinskoye Field. *Science. Innovations. Technologies*. 2022;(3): 75-96. (In Russ.).
 13. Dobrolyubova RK, Inyakina EI, Krasnov II, Inyakin VV, Semenenko AF. Forecast of hydrocarbon losses in a reservoir during the development of gas condensate fields. *Science. Innovations. Technologies*. 2024;(4): 111-142. (In Russ.).
 14. Sulaiman IN, Zeinalabideen MJ, Abed AA. An improved correlation to investigate the effect of chemical additives on the mobility ratio of two-phase flow *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*. 2021;9(1): 227–234.
 15. Inyakina E.I., Ostrovskaya T.D. Effect of non-hydrocarbon component content in reservoir gas on condensate recovery. *Scientific forum. Siberia*. 2022;8(2): 26-28. (In Russ.).

Информация об авторах

Добролюбова Розалия Кирилловна – старший преподаватель базовой кафедры «Нефтегазовое дело», МПТИ (ф) Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Scopus ID: 57216504633, Researcher ID: AAA-9825-2020.

Инякина Екатерина Ивановна – кандидат технических наук, доцент кафедры РЭНГ, Тюменский индустриальный университет, Scopus ID: 57208147649, Researcher ID: A-1091-2018.

Краснов Иван Игнатьевич – кандидат технических наук, доцент базовой кафедры «Нефтегазовое дело», МПТИ (ф) Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Scopus ID: 57208147750, Researcher ID: A-5654-2018.

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

Information about the authors

Rozaliya K. Dobrolyubova – Senior Lecturer of the Basic Department of Oil and Gas, Mirny Polytechnic Institute (branch) of North-Eastern Federal University, named after M.K. Ammosov, Scopus ID: 57216504633, Researcher ID: AAA-9825-2020.

Ekaterina I. Inyakina – Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor of the RENG Department, Tyumen Industrial University, Scopus ID: 57208147649, Researcher ID: A-1091-2018).

Ivan I. Krasnov – Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor of the Basic Department of Oil and Gas Business, MPTI (f) North-Eastern Federal University named after M. K. Ammosov, Scopus ID: 57208147750, Researcher ID: A-5654-2018.

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

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ
2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений
(технические науки)



Научная статья
УДК 553.98.048-047.58
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.7>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ tNavigator

Абдул-Гапур Гусейнович Керимов^{1*},
Эльдар Рамизович Гасумов²,
Альберт Артурович Пашаян³,
Елизавета Гапуровна Керимова⁴,
Наталья Григорьевна Федорова⁵

^{1, 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 akerimov@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4880-787X>

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

³ 18-abo@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-2180-0492>

⁴ elizavetakerimova11@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-9909-487X>

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

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

В работе рассмотрены вопросы моделирования технологических процессов при разработке месторождений углеводородов в программном комплексе «tNavigator» на примере симуляции гидравлического разрыва пласта и возможных зон гидратообразования. Актуальность моделирования связана с необходимостью повышения эффективности управления разработкой месторождений, снижения затрат и рисков в процессе добычи углеводородов, отмечено, что обеспечение математической экологической безопасности моделирование позволяет проверить работоспособность технологических решений по разработке сложно построенных залежей на цифровой 3D-гидродинамической модели. Обосновано, что модель позволяет оценить эффективность предложенного метода интенсификации притока, влияние конкретных параметров на успех разработки и провести сопоставление с другими решениями, в том числе создать прогнозную версию модели для планирования качественной разработки месторождения. Целью моделирования технологических процессов в программном комплексе

«tNavigator», например, для определения возможных зон гидратообразования является построение равновесной кривой гидратообразования, задание логических выражений и создание специальных свойств. Для моделирования гидравлического разрыва пласта (ГРП) используют следующие методы: скин-фактора, изменения коэффициента продуктивности перфорации, создания виртуальных перфораций и уменьшения сетки вокруг скважины. Метод скин-фактора применяется при малых трещинах менее размера ячеек. Трещина учитывается вскрытием выше- и нижележащих объектов моделирования, но не учитывает горизонтальную направленность трещины ГРП. Суть метода виртуальных перфораций – создание дополнительных виртуальных интервалов перфорации в ячейках, через которые проходит трещина. Коэффициенты проводимости перфораций вычисляются по полуэмпирическим зависимостям, учитывающим параметры ячейки и трещины. В программном комплексе «tNavigator» отсутствует функционал по определению и отображению в 3D-модели возможных зон гидратообразования. Для решения этой задачи было создано пользовательское свойство, в котором на языке программирования «Python» было задано логическое выражение, позволяющее определять необходимые зоны. В композиционной термической модели по заданному составу газа была построена равновесная кривая гидратообразования. В программном обеспечении «MS Excel 2010» была построена равновесная кривая гидратообразования по координатам, экспортированным из «tNavigator». Была определена зависимость равновесной температуры гидратообразования от равновесного давления гидратообразования, описываемая логарифмическим уравнением. С помощью «tNavigator» можно моделировать гидроразрыв пласта, технологию обработки призабойной зоны, методы увеличения нефтегазоотдачи и другие мероприятия. Рассмотрены несколько методов моделирования ГРП: с помощью скин-фактора, создания виртуальных перфораций и уменьшения сетки вокруг скважины. Рассмотрена методология построения равновесной кривой гидратообразования в «tNavigator». Выполнен расчёт по определению уравнения, описывающего кривую гидратообразования. С помощью языка программирования «Python» были заданы логические выражения для определения зон возможного гидратообразования. Проведены расчеты на гидродинамической модели, основанной на реальных данных месторождения. Создана термическая композиционная гидродинамическая модель, позволяющая отслеживать распределение и изменение в процессе разработки пластовой температуры. Показана

возможность прогнозирования и определения зон возможного гидратообразования при различных термобарических условиях и способах интенсификации притока к скважине. Некоторые преимущества использования «tNavigator»: высокая производительность расчёта на современной многоядерной, многопроцессорной технике, удобный графический интерфейс, поддержка любых форматов данных, ряд уникальных инструментов для моделирования геолого-технических мероприятий.

Ключевые слова: месторождение, углеводороды, программный комплекс, «tNavigator», моделирования, гидравлический разрыв пласта, гидратообразование

Для цитирования: Моделирование технологических процессов в программном комплексе «tNavigator» / А.-Г.Г. Керимов, Э.Р. Гасумов, А.А. Пашаян и др. // Наука. Инновации. Технологии. 2026. № 2. С. 149–176. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.7>

Конфликт интересов: доктора технических наук Керимов А.-Г.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 02.02.2026;
одобрена после рецензирования 11.05.2026;
принята к публикации 10.06.2026.

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

Research Article

Modeling of technological processes in the tNavigator software package

**Abdul-Gapur G. Kerimov^{1*},
Eldar R. Gasumov²,
Albert A. Pashayan³,
Elizaveta G. Kerimova⁴,
Natalia G. Fedorova⁵**

^{1, 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 akerimov@ncfu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4880-787X>

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

³ 18-abo@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-2180-0492>

⁴ elizavetakerimova11@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-9909-487X>

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

* Corresponding author

Abstract.

The paper examines the modeling of technological processes in hydrocarbon field development using the tNavigator software package by the example of simulating hydraulic fracturing and potential hydrate formation zones. The relevance of modeling is associated with the need to improve the efficiency of field development management, reduce costs and risks in hydrocarbon production. It is noted that, by ensuring mathematical environmental safety, modeling allows for the verification of the feasibility of technological solutions for developing complex reservoirs using a digital 3D hydrodynamic model. It is substantiated that the model allows for evaluating the effectiveness of the proposed inflow stimulation method, the impact of specific parameters on development success, and a comparison with other solutions, including the creation of a predictive version of the model for planning high-quality field development. The purpose of modeling technological processes in the tNavigator software package, for example, to identify potential hydrate formation zones, is to construct an equilibrium curve for hydrate formation, define logical expressions, and create special properties.

The following methods are used to simulate hydraulic fracturing (GRP): skin factor, perforation productivity factor modification, virtual perforation creation, and wellbore grid refinement. The skin factor method is used for small fractures smaller than the cell size. The fracture is accounted for by penetrating the overlying and underlying modeling objects, but does not account for the horizontal orientation of the HF fracture. The virtual perforation method creates additional virtual perforation intervals in the cells through which the fracture passes. Perforation conductivity coefficients are calculated using semi-empirical relationships that take into account cell and fracture parameters. The tNavigator software package lacks functionality for identifying and displaying potential hydrate formation zones in a 3D model. To address this issue, a custom property was created, in which a logical expression was defined in the Python programming language, allowing for the identification of the required zones. An equilibrium hydrate formation curve was constructed using a compositional thermal model for a given gas composition. Using MS Excel 2010 software, the equilibrium hydrate formation curve was plot-

ted using coordinates exported from tNavigator. The dependence of the equilibrium hydrate formation temperature on the equilibrium hydrate formation pressure was determined, described by a logarithmic equation. tNavigator can be used to simulate hydraulic fracturing, near-wellbore treatment technologies, enhanced oil and gas recovery methods, and other interventions. Several hydraulic fracturing modeling methods are considered, including skin factor simulation, virtual perforation generation, and wellbore grid reduction. A methodology for constructing an equilibrium hydrate formation curve in tNavigator is discussed. A calculation was performed to determine the equation describing the hydrate formation curve. Using the Python programming language, logical expressions were defined to identify zones of potential hydrate formation. Calculations were performed using a hydrodynamic model based on real field data. A thermal compositional hydrodynamic model was created, allowing for tracking the distribution and change in reservoir temperature during development. The feasibility of predicting and identifying zones of potential hydrate formation under various pressure-temperature conditions and wellbore stimulation methods is demonstrated. Some of the advantages of using tNavigator include high calculation performance on modern multi-core, multi-processor hardware, a user-friendly graphical interface, support for all data formats, and a range of unique tools for modeling geological and technical interventions.

Keywords: field, hydrocarbons, software suite, tNavigator, modeling, hydraulic fracturing, hydrate formation

For citation: Kerimov A-GG, Gasumov ER, Pashayan AA, Kerimova EG, Fedorova NG. Modeling of technological processes in the tNavigator software package. *Science. Innovations. Technology*. 2026;(2):149-176. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.7>

Conflict of interest: Doctors of technical sciences Kerimov A.G. and Fedorova N.G. are members of the editorial board of the *Science. Innovation. Technology* journal. The authors are unaware of any other potential conflict of interests related to this manuscript.

The article was submitted 02.02.2026;
approved after reviewing 11.05.2026;
accepted for publication 10.06.2026.

Введение

Технологические процессы при разработке месторождений углеводородов (УВ) включают геологоразведочные работы (ГРП), бурение скважин, эксплуатацию и при необходимости воздействие на пласт (в том числе гидравлический разрыв пласта). Эти процессы направлены на извлечение нефти, газа, конденсата и попутных компонентов из пластов и управление процессом разработки залежей углеводородов.

Моделирование технологических процессов при разработке месторождений углеводородов (УВ) в программном комплексе «tNavigator» необходимо для повышения экономической эффективности и надёжности эксплуатации объекта [6; 7; 8], что в первую очередь снижает риск ошибочных действий, так как численное моделирование позволяет контролировать работоспособность технологических решений по разработке сложнопостроенных объектов на компьютерной 3D-гидродинамической модели. Благодаря используемому программному комплексу можно оценить эффективность методов разработки месторождения УВ. Модель позволяет определить, влияние конкретного параметра на успех разработки, провести сопоставление с другими решениями, оптимизировать работу месторождений УВ, прогнозировать уровень добычи УВ и снижение затрат на эксплуатацию. С помощью «tNavigator» можно решить такие задачи, как: создание прогнозной версии модели, оценка эффективности обработки призабойной зоны пласта (ПЗП), расстановка скважин по заданной схеме разработки и другие мероприятия, направленные на планирование разработки месторождения.

Актуальность моделирования технологических процессов при разработке месторождений углеводородов в программном комплексе «tNavigator» связана с несколькими факторами (табл. 1).

С помощью «tNavigator» решаются и такие задачи: долгосрочное планирование разработки месторождений; оптимизация расположения скважин; анализ эффективности методов увеличения нефтеотдачи; прогнозирование дебитов и давления в скважинах; оценка запасов углеводородов; анализ рисков и неопределённостей, связанных с разработкой месторождения. «tNavigator» позво-

Таблица 1.

**АКТУАЛЬНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УВ**
Table 1. Relevance of modeling technological processes
in the development of hydrocarbon deposits

Решаемая задача	Функциональная возможность
Оптимизация работы месторождений УВ	Помогает в оптимизации работы месторождений, с использованием прогнозирования уровня добычи и снижения затрат на эксплуатацию
Снижение рисков ошибочных действий	Численное моделирование позволяет проверить работоспособность технологических решений по разработке сложно-построенных комплексов на компьютерной 3D-гидродинамической модели
Оценка эффективности методов разработки	Позволяет оценить эффективность предложенного метода, влияние конкретных параметров на успех разработки и провести сравнение с другими решениями
Решение различных задач на нефтегазодобывающих предприятиях	Создание прогнозной версии модели для планирования разработки месторождения, оценка эффективности обработки призабойной зоны и другие задачи

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

ляет интегрировать и анализировать данные из различных источников, создавать динамические модели резервуаров, моделировать многоконтурные потоки (нефть, газ, вода) в трубопроводных системах и резервуарах, а также анализировать данные в режиме реального времени. В рамках решаемых задач с помощью «tNavigator» на нефтегазодобывающих предприятиях возможно создание прогнозной версии модели для планирования разработки месторождения УВ, оценка эффективности обработки призабойной зоны кислотами и другие.

Моделирование технологических процессов в программном комплексе «tNavigator» является платформой для проектирования и симуляции процессов добычи и переработки нефти и газа, включая управление резервуарами и динамическое моделирование [1; 2; 3; 4; 5]. Программный комплекс «tNavigator» владеет некоторыми возможностями (табл. 2).

Таблица 2. ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «TNAVIGATOR»
Table 2. Capabilities of the tNavigator software package

Решаемая задача	Функциональная возможность
Интеграция данных из различных источников	Программа позволяет интегрировать и анализировать данные из различных источников, таких как сейсмические, геологические и геофизические данные, а также данные о процессе добычи УВ
Моделирование поведения резервуаров	Программа предоставляет инструменты для создания динамических моделей резервуаров, что помогает в прогнозировании работы месторождений и анализе их продуктивности
Моделирование 3-фазной фильтрации в пласте с учетом термобарического эффекта	Есть возможности моделирования многоконтурных потоков (нефть, газ, вода) в трубопроводных системах и резервуарах
3D-визуализация	«tNavigator» поддерживает создание 3D-моделей, что позволяет наглядно визуализировать геологические структуры, процессы добычи и движения флюидов
Оптимизация разработки месторождений	Программное обеспечение помогает в оптимизации работы месторождений, прогнозировании уровня добычи и снижении затрат на эксплуатацию
Анализ данных в реальном времени	«tNavigator» позволяет анализировать данные в реальном времени, что помогает принимать решения на основе актуальной информации

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

Материалы и методы исследований

Объектами исследования при моделировании технологических процессов в программном комплексе «tNavigator» являются месторождения углеводородов. Методика исследования включает в себя следующие этапы:

- **постановка задачи моделирования.** Определяется конкретная задача гидродинамического моделирования, выбранная для исследования. Описываются геометрия исследуемого объекта, граничные условия и физические свойства жидкости или газа;

- разработка численной модели, включающая создание сетки, выбор параметров расчёта и определение граничных условий;
- анализ результатов моделирования – результаты численного моделирования представляются в виде графиков, диаграмм и анимаций (проводится анализ полученных данных, выявляются закономерности и особенности течения жидкости или газа);
- верификация и валидация модели происходит путём сравнения результатов моделирования с теоретическими данными или экспериментальными измерениями;
- оценивается адекватность модели.

«tNavigator» является единым программным комплексом, позволяющим создавать геологические и динамические модели нефтегазовых месторождений, моделировать PVT-свойства, строить поверхностную сеть, выполнять расчёт модели, а также анализировать неопределённости в рамках единого интерфейса.

Результаты исследований и их обсуждение

1. Моделирование гидравлического разрыва пласта

При разработке месторождений УВ, особенно трудноизвлекаемых запасов, приуроченных к низкопроницаемым, слабодренируемым, расчленённым и неоднородным коллекторам, проведение гидроразрыва пласта является одним из основных методов интенсификации пластового флюида. Проведение этих технологических операций направлены: на увеличение производительности добывающих скважин за счёт снижения гидравлических сопротивлений в призабойной зоне и увеличение фильтрационной поверхности скважины; повышение углеводородоотдачи пластов за счёт приобщения к выработке слабодренируемых зон и пропластков; увеличение срока эксплуатации скважин [11; 12; 25; 26]. Для прогнозирования распространения трещины в пласте с учётом геологического строения, геомеханических свойств пород, динамики течения жидкости разрыва и транспорта проппанта важ-

ным этапом технологического процесса при интенсификации притока из пласта является моделирование ГРП с целью оптимизации его дизайна, направленного на повышение продуктивности скважин и снижение затрат на реализацию мероприятия. Это особенно актуально для проектирования и оптимизации процессов ГРП, для пластов с трудноизвлекаемыми запасами углеводородов и объектов, стимуляция которых осложнена наличием близлежащих водонасыщенных пластов или газонефтяного или водонефтяного контактов (ГНК, ВНК) [18; 19; 20; 21]. Особенности и параметры, учитываемые при моделировании ГРП [22; 23; 24], отражены на рисунке (рис. 1).

Для моделирования ГРП используют симуляторы гидроразрыва пласта – промышленное программное обеспечение, которое рассчитывает геометрию будущей трещины с учётом пластовых условий. Некоторые функции симуляторов: расчёт и визуализация закреплённой геометрии трещины гидроразрыва после закрытия трещины проппантом; расчёт фильтрационно-ёмкостных свойств закреплённой трещины гидроразрыва и прироста продуктивности скважины от ГРП. Результаты моделирования ГРП используют для: оценки продуктивности скважины после ГРП – выявление закономерности между динамикой расхода жидкости и изменением давления на забое скважины и в трещине ГРП; уточнения интерпретации гидродинамических исследований скважин (ГДИС) – результаты моделирования помогают определить фильтрационные характеристики трещины и пласта в плоскопараллельной и радиальной зонах фильтрации; верификации решений – результаты моделирования сопоставляют с реальными промысловыми данными [10; 11].

Для моделирования ГРП используются несколько способов: метод скин-фактора, изменение коэффициента продуктивности перфорации, метод виртуальных перфораций и метод уменьшения сетки вокруг скважины [27; 28].

Метод скин-фактора применяется для малых трещин (менее размера ячеек). Моделированием рассматривается, как могут вскрываться выше- и нижележащие объекты, но не учитывается горизонтальная направленность трещины ГРП.

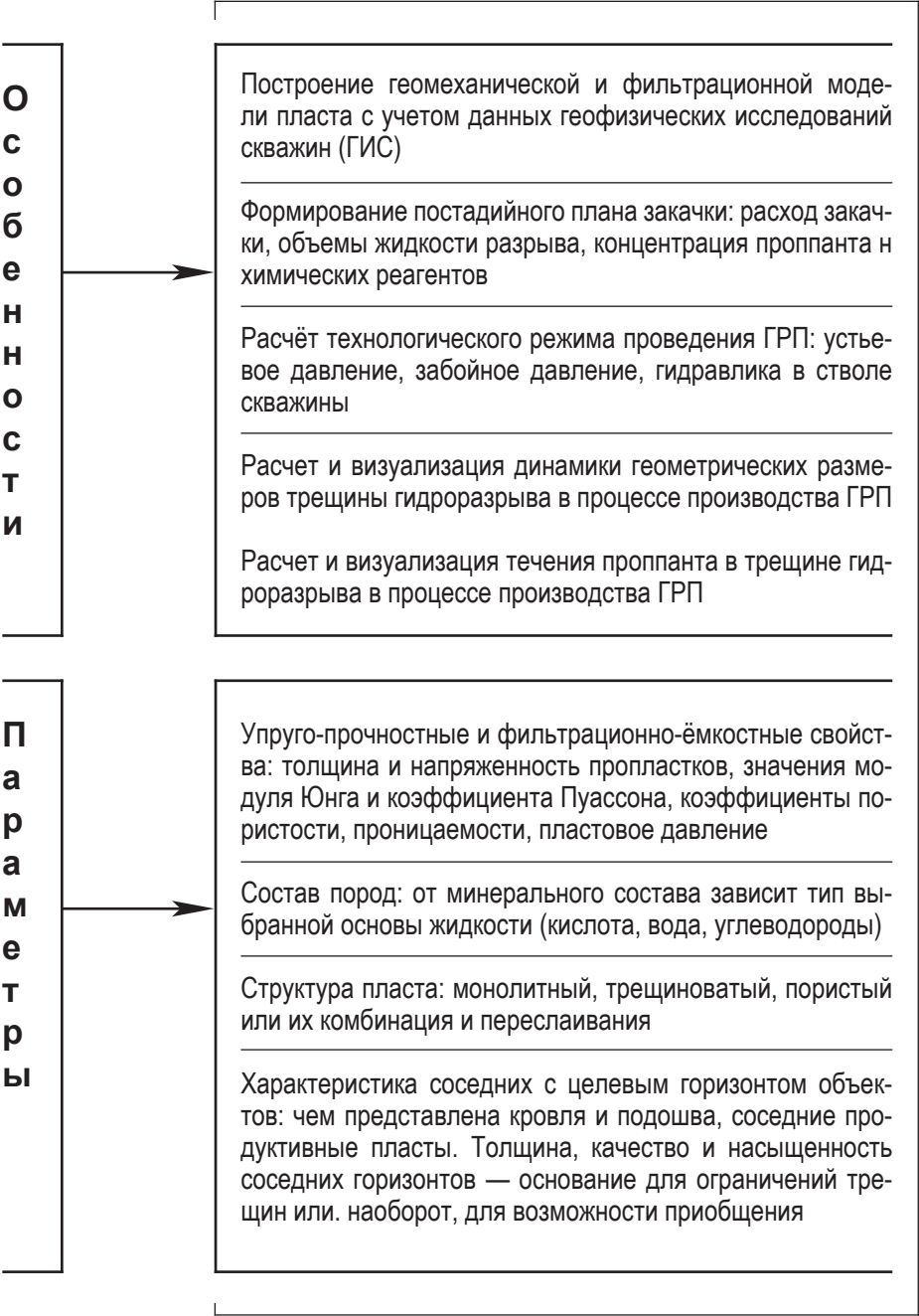


Рис. 1.

Особенности и параметры, учитываемые при моделировании ГРП.

Fig. 1. Features and parameters taken into account when modeling hydraulic fracturing.

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

Виртуальные перфорации. К скважине добавляются дополнительные виртуальные интервалы перфорации в ячейках, через которые проходит трещина. Коэффициенты проводимости перфораций вычисляются по полуэмпирическим формулам, учитывающим параметры ячейки и трещины.

В данной работе применен способ создания локальных измельчений сетки (LGR), он наиболее распространен для моделирования гидравлического разрыва пласта для месторождений с трудноизвлекаемыми запасами. Данная модель ГРП основана на измельчении сетки в зоне трещины и изменении свойств пласта, затронутого ГРП – SRV (Stimulated Rock Volume), что позволяет смоделировать зону самой трещины и зону её влияния, а также задавать различные формы трещин. Особенность данного способа состоит в поэтапности его осуществления – изначально задаётся высокая проницаемость в зоне трещины и дальнейшее снижение в зоне влияния трещины. Благодаря этому метод позволяет воспроизвести фактические темпы падения продуктивности скважин в условиях низкой проницаемости коллектора, а также эффект от выпадения конденсата в призабойной зоне пласта (ПЗП).

Рассматриваются две зоны образования трещины: зона трещины (ЗТ) и зона вторичной трещиноватости (ЗВТ), осуществляется модификация свойств в каждой зоне. При построении трещин ГРП возможны два основных типа локального измельчения сетки:

- неструктурированные сетки, создаваемые системой вложенных LGR (используются в программном пакете «tNavigator» по умолчанию);
- логарифмическое разбиение.

Моделирование локального измельчения сетки с помощью логарифмического разбиения значительно увеличивает время расчета, ввиду чего в данной работе был выбран тип неструктурированной сетки.

Процесс задания гидравлического разрыва пласта осуществлялся в 4 этапа:

- I – проекция ГРП;
- II – шаблон ГРП XYZ;

- III – стадии ГРП;
- IV – арифметика ГРП.

В проекции ГРП задается полилиния (набор точек x, y, z) для построения трещины. Из заданных точек была выбрана точка привязки, расположенная на траектории скважины.

В шаблоне ГРП были заданы геометрические параметры трещины и зоны её влияния. Размер трещины в направлении, противоположном оси Z – 10 м, размер трещины в направлении по оси Z – 10 м, ширина зоны трещины – 70 м, коэффициент проницаемости в зоне трещины – 500 мД, протяженность зоны SRV слева от точки привязки – 35 м, протяженность зоны SRV справа от точки привязки – 35 м.

В настройках стадии ГРП была выбрана скважина WU_13 с указанием длины скважины, начала стадии и конца стадии ГРП. На скважине планируется проведение многостадийного (3 стадии) ГРП.

В арифметике ГРП были заданы фильтрационные параметры после проведения гидравлического разрыва пласта (табл. 3).

Таблица 3. АРИФМЕТИКА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА
Table 3. Arithmetic of hydraulic fracturing (compiled by the authors)

Свойство сетки	Зона трещины	Интерполяция	Значение в начале мДа	Значение в зоне влияния мДа
PermX	Зона трещины	Постоянная	500	500
PermX	Зона влияния трещины	Линейная радиальная	50	28
PermY	Зона трещины	Постоянная	500	500
PermY	Зона влияния трещины	Линейная радиальная	50	28
PermZ	Зона трещины	Постоянная	500	500
PermZ	Зона влияния трещины	Линейная радиальная	50	28
Poro	Зона	Постоянная	0,9	0,5

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

Согласно проекту, был выбран трехстадийный гидравлический разрыв пласта как наиболее оптимальный вариант с точки зрения рентабельности и эффективности. В таблице 3 задаются параметры проницаемости в трех направлениях, а также коэффициента пористости, параметры в зоне трещины и в зоне влияния трещины, а также способ интерполяции данных параметров. Благодаря таблице есть возможность адаптации значений гидродинамической модели под реальные данные.

Для моделирования ГРП в стратегии разработки было добавлено свойство «Активировать трещину» и «Перфорация стадии ГРП».

Моделирование гидравлического разрыва пласта позволяет определить целесообразность использования данного метода интенсификации притока для конкретного пласта, пропластка, а также эмпирическим способом определить эффективность различных параметров гидравлического разрыва пласта.

2. *Моделирования возможных зон гидратообразования*

Гидраты (газовые гидраты) могут образовываться в разных зонах при эксплуатации скважин [29; 30]. В ПЗП из-за интенсивного охлаждения добываемого газа за счёт дроссель-эффекта или теплообмена скважины с окружающими мерзлыми горными породами могут формироваться газовые гидраты. При высоком пластовом давлении на многих газовых и газоконденсатных месторождениях гидраты образуются в стволе скважины. Механизм гидратообразования в затрубном пространстве отличается от процесса в насосно-компрессорных трубах нефтяной скважины из-за контакта межтрубного пространства с многолетнемерзлыми породами и наличия линии динамического уровня, определяемая работой насоса. Скорость образования гидратов при контакте природного газа с водой увеличивается с понижением температуры и повышением давления. Также ускоренному образованию гидратов способствуют турбулентное течение сырьевого потока и наличие центров кристаллизации (дефекты трубопроводов, арматура, внутренние элементы сепараторов).

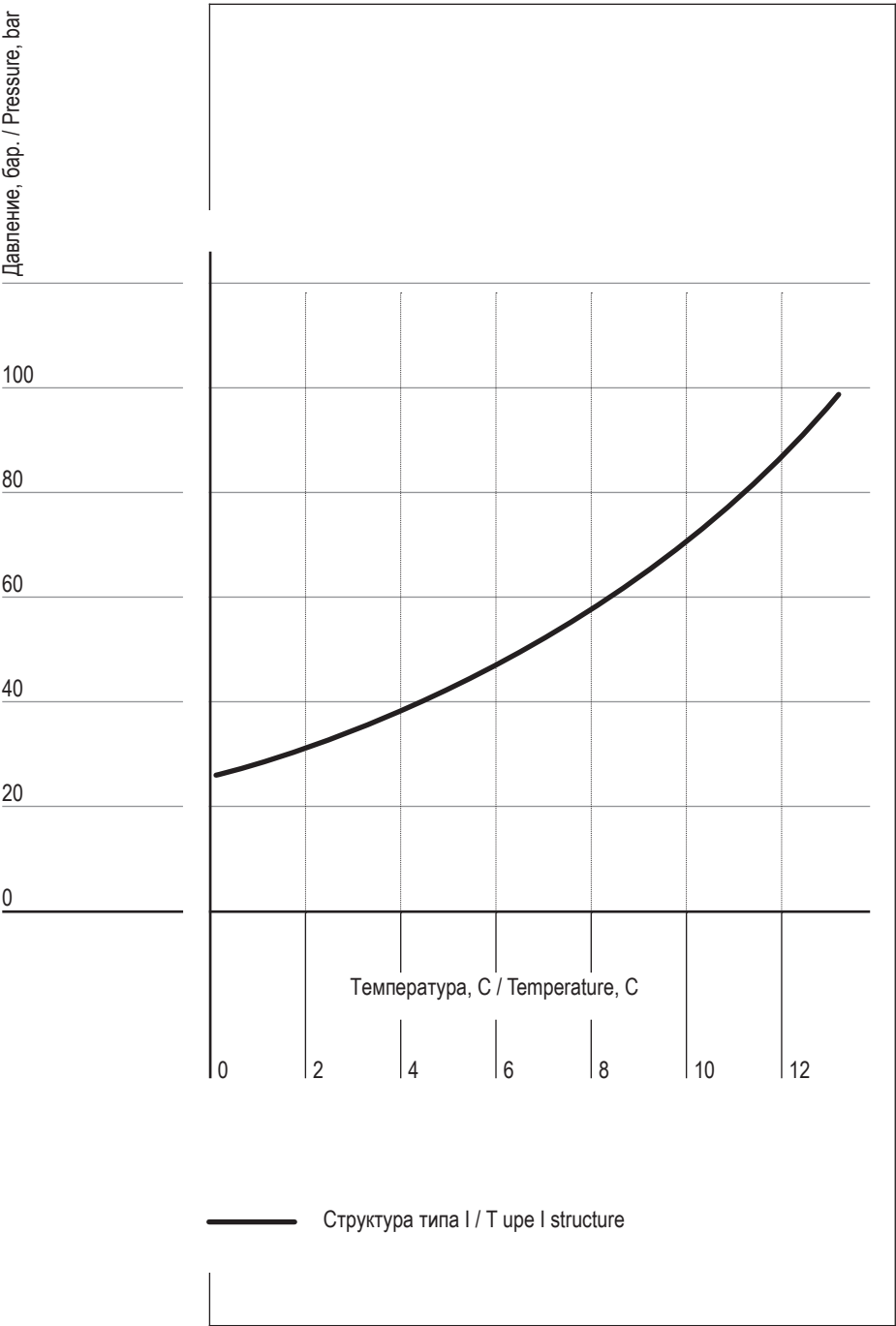


Рис. 2.

Равновесная кривая гидратообразования.

Fig. 2. Equilibrium curve of hydrate formation.

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

В программном комплексе «tNavigator» отсутствует функционал по определению и отображению на 3D-модели возможных зон гидратообразования. Для решения данной задачи было создано пользовательское свойство, в котором на языке программирования «Python» было задано логическое выражение, определяющее необходимые зоны. В композиционной модели по заданному составу газа была построена равновесная кривая гидратообразования (рис. 2).

Построение равновесной кривой гидратообразования происходило в композиционной термической гидродинамической модели, для чего задавался компонентный состав газа туронской залежи, близкий к составу сеноманского газа: метан – 98,9157 %, азот – 1,0187 %, этан – 0,0419 %, гелий – 0,016 %, углекислый газ – 0,0058 %, пропан – 0,0019 %. Помимо состава газа на равновесную кривую гидратообразования влияет минерализация пластовой воды, при задании которой кривая сдвигается в область более высокого давления и низкой температуры. В данной модели была задана минерализация 18 г/л. Каждая точка кривой гидратообразования имеет свое значения давления и температуры, которые указываются в «tNavigator» в отдельной таблице. Этот массив необходим для определения уравнения, описывающего равновесную кривую гидратообразования.

В программном комплексе «MS Excel 2010» была построена равновесная кривая гидратообразования по координатам, экспортированным из программного комплекса «tNavigator». Было определено логарифмическое уравнение, описывающее зависимость равновесной температуры от равновесного давления гидратообразования:

$$T_p = 9,893 * \ln P_p - 32,084 \quad (1)$$

С помощью логического выражения в программном пакете «tNavigator» было задано свойство, определяющее зоны, в которых текущие термобарические условия соответствуют зоне гидратообразования. Фрагмент логического выражения для определения возможных зон гидратообразования в программном пакете «tNavigator» представлен на рисунке 3.

```
If result_property ("Pressure")<=99.01325 & result_property ("Pressure")>=26.01325 then  
if result_property ("Temperature")<9.893*ln (result_property ("Pressure"))-32.084 then  
1  
else 0  
endif  
else 0  
endif
```

Рис. 3.**Логическое выражение для определения возможных зон гидратообразования.**

Fig. 3. Logical expression for determining possible hydrate formation zones.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

Соответственно логическому выражению, если в ячейках сетки давление и температура попадают в область гидратообразования, то ячейка обозначается единицей, в противном случае, если термобарические условия не входят в зону возможного гидратообразования, то ячейка обозначается 0.

Таким образом, включая данное свойство задавая с помощью настроек отображение ячеек со значением 1, можно просмотреть в динамике зоны возможного гидратообразования (рис. 4).

На рисунке 4 показана зона возможного гидратообразования. С помощью построения равновесной кривой гидратообразования, задания логических выражений и создания специальных свойств в программном комплексе «tNavigator», мы получаем возможность отслеживать, прогнозировать и при необходимости предупреждать появление зоны возможного гидратообразования. В данном случае зона возможного гидратообразования появляется в результате проведения гидравлического разрыва пласта. В зоне трещины градиенты давления высоки, а коэффициент пористости стремится к единице, совокупность данных факторов говорит о том, что величина коэффициента Джоуля-Томсона в трещине будет велика, что приводит к резкому снижению температуры, а предгидратный термобаричес-

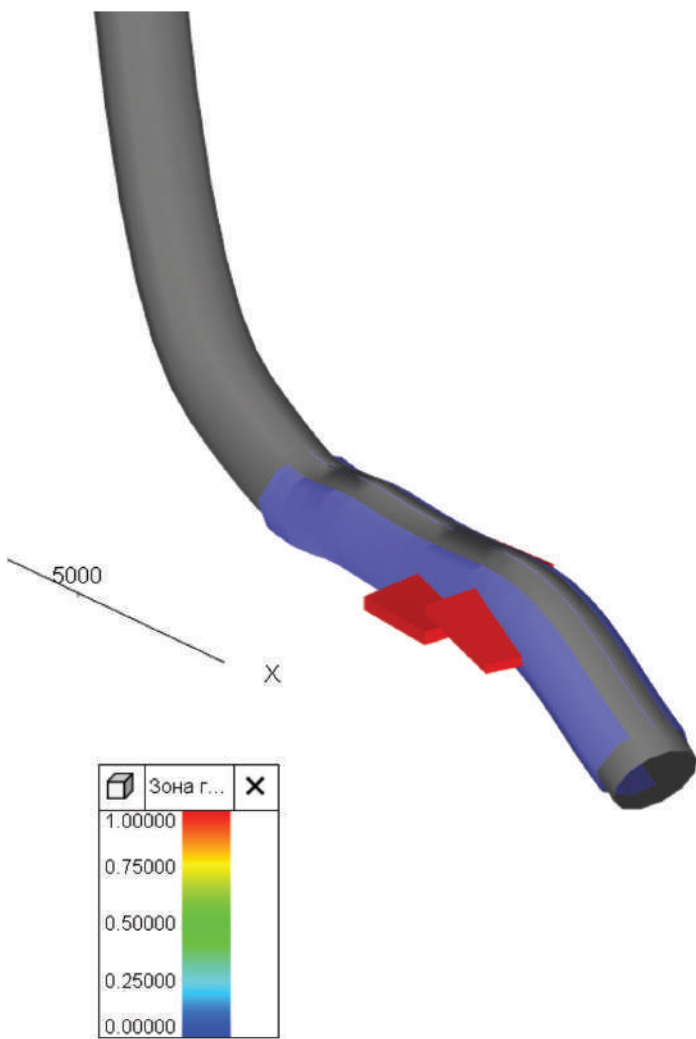


Рис. 4. Зона возможного гидратообразования.
Fig. 4. Zone of possible hydrate formation.
Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

кий режим работы пласта приводит к появлению зон возможного гидратообразования.

Заключение

В заключение работы по моделированию технологических процессов в программном комплексе «tNavigator» (гидро-разрыва пласта с определением зон возможного гидратообразования в гидродинамическом симуляторе «tNavigator») можно подвести итоги и сформулировать основные выводы.

1. С помощью «tNavigator» можно моделировать гидроразрыв пласта, обработку призабойной зоны, методы увеличения нефтегазоотдачи и другие мероприятия.
2. Рассмотрены несколько методов моделирования ГРП: с помощью скин-фактора, изменения коэффициента продуктивности перфорации, создания виртуальных перфораций и уменьшения сетки вокруг скважины.
3. Проведено сравнение и сопоставление размеров трещины ГРП и скин-факторов, определён оптимальный метод.
4. Рассмотрена методология построения равновесной кривой гидратообразования в tNavigator.
5. Выполнен расчёт по определению уравнения, описывающего кривую гидратообразования.
6. С помощью языка программирования «Python» были заданы логические выражения для определения зон возможного гидратообразования.
7. Проведены расчёты на гидродинамической модели, основанной на реальных данных залежи.
8. Создана термическая композиционная гидродинамическая модель, позволяющая отслеживать распределение и изменение пластовой температуры в процессе разработки.
9. Показана возможность прогнозирования и опреде-

ления зон возможного гидратообразования при различных термобарических условиях и применении способов интенсификации притока к скважине.

10. «tNavigator» – программный пакет, позволяющий создавать геологические и динамические модели нефтегазовых месторождений, выполнять расчёт модели и анализировать неопределённости в рамках единого интерфейса.
11. Некоторые преимущества использования «tNavigator»: высокая производительность расчёта на современной многоядерной/многопроцессорной технике, удобный графический интерфейс, поддержка любых форматов данных, ряд уникальных инструментов для моделирования геолого-технических мероприятий.

Список источников

1. Мигунова С., Горянц И., Дирани Ф. Разработка нефтяных и газовых месторождений: методические указания к практическим занятиям. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургский горный университет, 2022. 25 с.
2. Эйдинов Д. А. «tNavigator» – гидродинамический симулятор нового поколения // Наука о Земле. 2015. С. 62–69.
3. Моделирование месторождений нефти и газа на кластерах / К. Ю. Богачев, М. Ю. Михалева, А. Р. Миргасимов, Е. Ю. Попеленский // Суперкомпьютерные технологии в науке, образовании и промышленности. Выпуск V. Москва: МГУ, 2014. С. 61–68.
4. Моделирование месторождений и залежей нефти и газа для решения задач разведки и разработки / В. Ю. Керимов, Р. Н. Бахтизин, К. И. Данцова, И. М. Салихов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2018. № 5. С. 52–56. <https://doi.org/10.24411/0131-4270-2018-10307>.
5. Повышение эффективности и безопасности поисков, разведки и разработки месторождений нефти и газа на акватории Охотского моря / В. И. Богоявленский, В. Ю. Керимов, О. О. Ольховская, Р. Н. Мустаев // Территория Нефтегаз. 2016. № 10. С. 24–32.

6. Минханов И. Ф., Долгих С. А., Варфоломеев М. А. Разработка нефтяных и газовых месторождений: учеб. пособие для вузов. Казань: Изд-во Казанского федерального университета, 2019. 96 с.
7. Lavrenova E. A., Kerimov V. Yu., Panov Yu. P., Mustaev R. N., Serikova U. S. Breakthrough technologies in solving problems of geological exploration for oil and gas // SOCAR Proceedings Special Issue. 2022. No. 1. P. 73–83.
8. Senin B. V., Leonchik M. I., Osheroва N. A. The main results of geological exploration and prospects for the development of the raw material base of hydrocarbons in the waters of the Black Sea-Caspian region // Mineral resources of Russia. Economics and Management. 2018. No. 2. P. 7–17.
9. Gasumov R. A., Gasumov E. R. Mathematical models for calculating filtration processes in gas condensate fields // On a new paradigm for the development of oil and gas geology: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. Kazan: Ikhlas Publishing House, 2020. P. 174–178.
10. Gasumov R. A., Gasumov E. R. Impact of injection of industrial liquid waste on hydrodynamic conditions of receiving horizon // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. 2025. V. 335(5). P. 37–48. <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/5/4726>.
11. Gasumov R. A., Gasumov E. R. Assessing the Hydrodynamic Performance of the Well-Reservoir System Formed at the Stage of Producing Reservoir Drilling // Geology and Geophysics of Southern Russia. 2023. No. 4. P. 108–123. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.58.47.009>.
12. Gasumov R. A., Gasumov E. R. Mathematical model for injection of viscoelastic compositions into the productive formation // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2023. V. 334. No. 03. P. 218–228. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/3/3791>.
13. Gasumov R. A., Gasumov E. R., Veliev V. M., Gasumov V. A., Suleimanov G. S., Ibrahimova S. V. 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. V. 333(6). P. 86–95. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/6/3739>.

14. Eyvazov J. Sensitivity analysis of oil and gas production as a result of increasing the drainage area with changes in well parameters during different completion of wells // SOCAR Proceedings. 2022. No.2. P. 19–22. <https://doi.org/10.5510/OGP20220200669>.
15. Prasun S., Kumar A. Drainage areas, shapes and reservoirs for wells in reservoirs with multiple fluid contacts / Constant Pressure Boundaries/ SPE -196184-MS. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. 2019, September. <https://doi.org/10.2118/196184-ms>.
16. Алиев З. С., Бондаренко В. В. Руководство по проектированию разработки газовых и газонефтяных месторождений. Печора: Печорское Время, 2013. 894 с.
17. Азиз Х., Сеттари Э. Математическое моделирование пластовых систем. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2004. 416 с.
18. Елисеев П. И., Шорохов А. Н., Язьков А. В. Сравнительный анализ методик геомеханического моделирования гидравлического разрыва пласта // Экспозиция Нефть Газ. 2016. № 5(51). С. 21–24.
19. Аносова Е. П. Фильтрация флюида к скважине через радиальную трещину ГРП при постоянном расходе // Известия РАН. Механика жидкости газа и плазмы. 2023. № 2. С. 90–101.
20. К вопросу выбора длительности режимов при гидродинамических исследованиях скважин на установившихся режимах закачки в низкопроницаемых коллекторах / Г. Ф. Асалхузина, Г. Ф. Давлетбаев, И. Л. Хабибуллин, Р. Р. Ахметова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. Т. 6, №1(21). С. 135–149.
21. Моделирование процесса заводнения при наличии несплошности нефтяного пласта / В. И. Астафьев, И. А. Васильев, И. И. Киреев, С. А. Булгаков // Ашировские чтения. 2022. Т. 2, № 1(13). С. 107–116.
22. К оценке геометрических параметров трещины гидроразрыва пласта / В. А. Байков, Г. Т. Булгакова, А. М. Ильясов, Д. В. Кашапов // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2018. № 5 С. 64–75.

23. Давлетбаев А. Я., Мухаметова З. С. Моделирование фильтрации в низкопроницаемом пласте с двумя перпендикулярными техногенными трещинами гидроразрыва. // Инженернофизический журнал. 2017. Т. 90, № 3. С. 632–639.
24. Давлетбакова Л. А., Давлетбаев А. Я. Моделирование исследования методом установившихся режимов закачки между нагнетательной и добывающей скважинами с техногенной трещиной гидроразрыва // Вестник Башкирского университета. 2016. Т. 21, №4. С. 884–892.
25. Александров Г. С. Гидравлический разрыв пласта: сущность технологии, зарубежный и отечественный опыт применения // Научный Лидер. 2022. № 35 (80). URL: <https://scilead.ru/article/2886-gidravlicheskiy-razriv-plasta-sushchnost-tekh>.
26. Яркеева Н. Р., Хазиев А. М. Применение гидроразрыва пласта для интенсификации притока нефти в скважинах // Нефтепромысловое дело. 2018. Т. 16. № 5. С. 30–36. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2018-5-30-36>.
27. Нурғалиева А. А., Малышев В. Л. Подбор комплекса гидродинамических исследований скважин для достоверного прогноза параметров пласта на Вишневском месторождении // Нефтегазовое дело. 2020. № 4. С. 48–57.
28. Прокофьева А. С. Моделирование гидроразрыва пласта в гидродинамическом симуляторе // Вестник науки. 2023. № 5(62). Т. 2. С. 481–491. <https://www.вестник-науки.рф/article/8158>.
29. Бузников Н. А., Истомин В. А., Митницкий Р. А. Моделирование динамики движения ингибиторов гидратообразования в промысловых трубопроводах // Газовая промышленность. 2016. № 2. С. 94–98.
30. Kolchin A. V. Analysis of hydrate formation with the use of neural networks // SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September-2 October, New Orleans, Louisiana, USA. 2013 (<https://doi.org/10.2118/167618-STU>).

References

1. Migunova S, Goryants I, Dirani F. Development of Oil and Gas Fields: Guidelines for Practical Classes. St. Petersburg. Publishing House of St. Petersburg Mining University; 2022. 25 p. (In Russ.).

2. Eidinov DA. «tNavigator» – a Next-Generation Hydrodynamic Simulator. *Earth Science*. 2015. P. 62-69. (In Russ.).
3. Bogachev KYu, Mikhaleva MYu, Mirgasimov AR, Popelensky EYu. Modeling of Oil and Gas Fields on Clusters. *Supercomputer Technologies in Science, Education, and Industry. Issue V*. Moscow State University; 2014. P. 61–68. (In Russ.).
4. Kerimov VYu, Bakhtizin RN, Dantsova KI, Salikhov IM. Modeling of oil and gas fields and accumulations for solving exploration and development problems. *Transport and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials*. 2018;(5):52-56. <https://doi.org/10.24411/0131-4270-2018-10307>. (In Russ.).
5. Bogoyavlensky VI, Kerimov VYu, Olkhovskaya OO, Mustaev RN. Improving the efficiency and safety of prospecting, exploration and development of oil and gas fields in the Sea of Okhotsk. *Territory of Oil and Gas*. 2016;(10):24-32. (In Russ.).
6. Minkhanov IF, Dolgikh SA, Varfolomeev MA. Development of oil and gas fields: a textbook for universities. Kazan: Publishing House Kazan Federal University; 2019. 96 p. (In Russ.).
7. Lavrenova EA, Kerimov VYu, Panov YuP, Mustaev RN, Serikova US. Breakthrough technologies in solving problems of geological exploration for oil and gas. *SOCAR Proceedings Special Issue*. 2022;(1):73-83.
8. Senin BV, Leonchik MI, Osherova NA. The main results of geological exploration and prospects for the development of the raw material base of hydrocarbons in the waters of the Black Sea-Caspian region. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*. 2018;(2):7-17.
9. Gasumov RA, Gasumov ER. Mathematical models for calculating filtration processes in gas condensate fields. On a new paradigm for the development of oil and gas geology: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Kazan: Ikhlas Publishing House; 2020. P. 174–178.
10. Gasumov RA, Gasumov ER. Impact of injection of industrial liquid waste on hydrodynamic conditions of receiving horizon. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering*. 2025;335(5):37-48. <https://doi.org/10.18799/24131830/2025/5/4726>.
11. Gasumov RA, Gasumov ER. Assessing the Hydrodynamic Performance of the Well-Reservoir System Formed at the Stage of Producing Reservoir Drilling. *Geology and Geo-*

- physics of Southern Russia. 2023;(4):108-123. <https://doi.org/10.46698/VNC.2023.58.47.009>.
12. Gasumov RA, Gasumov ER. Mathematical model for injection of viscoelastic compositions into the productive formation. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2023;334(3):218-228. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/3/3791>.
 13. Gasumov RA, Gasumov ER, Veliev VM, Gasumov VA, Suleimanov GS, Ibrahimova SV. 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. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/6/3739>.
 14. Eyvazov J. Sensitivity analysis of oil and gas production as a result of increasing the drainage area with changes in well parameters during different well completions. SOCAR Proceedings. 2022;(2):19-22. <https://doi.org/10.5510/OGP20220200669>.
 15. Prasun S, Kumar A. Drainage areas, shapes, and reservoirs for wells in reservoirs with multiple fluid contacts. Constant Pressure Boundaries. SPE -196184-MS. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers. 2019, September. <https://doi.org/10.2118/196184-ms>.
 16. Aliyev ZS, Bondarenko VV. Guide to the Design of Oil and Gas Field Development. Pechora: Pechorskoye Vremya; 2013. 894 p. (In Russ.).
 17. Aziz H, Settari E. Mathematical Modeling of Reservoir Systems. Moscow-Izhevsk: Institute of Computer Research; 2004. 416 p. Article from a Russian-language journal. (In Russ.).
 18. Eliseev PI, Shorokhov AN, Yazkov AV. Comparative Analysis of Methods for Geomechanical Modeling of Hydraulic Fracturing. Exposure Oil Gas. 2016;5(51):21-24. (In Russ.).
 19. Anosova EP. Fluid filtration to the wellbore through a radial hydraulic fracture at a constant flow rate. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of fluid, gas and plasma. 2023;(2):90-101. (In Russ.).
 20. Asalkhuzina GF, Davletbaev GF, Khabibullin IL, Akhmetova RR. On the issue of choosing the duration of modes in hydrodynamic studies of wells under steady-state injection modes

in low-permeability reservoirs. Bulletin of Tyumen 106th State University. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, energy. 2020;6-1(21):135-149. Article from a Russian-language journal. (In Russ.).

21. Astafyev VI, Vasiliev IA, Kireev II, Bulgakov SA. Modeling the waterflooding process in the presence of a discontinuity in the oil reservoir. Ashirov Readings. 2022;2-1(13):107-116. (In Russ.).
22. Baikov VA, Bulgakova GT, Ilyasov AM, Kashapov DV. On the assessment of the geometric parameters of a hydraulic fracturing fracture. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of Liquid and Gas. 2018;(5):64-75. (In Russ.).
23. Davletbaev AY, Mukhametova ZS. Modeling of filtration in a low-permeability formation with two perpendicular man-made hydraulic fractures. Engineering-physical journal. 2017;90(3):632-639. (In Russ.).
24. Davletbakova LA, Davletbaev AY. Modeling of a study using the method of steady-state injection modes between injection and production wells with a man-made hydraulic fracture. Bulletin of Bashkir University. 2016;21(4):884-892. (In Russ.).
25. Aleksandrov GS. Hydraulic fracturing: the essence of the technology, foreign and domestic application experience. Scientific Leader. 2022;35(80). URL: <https://scilead.ru/article/2886-gidravlicheskiy-razriv-plasta-sushchnost-tekh>. (In Russ.).
26. Yarkeeva NR, Khaziev AM. Application of hydraulic fracturing to stimulate oil inflows in wells. Oil Field Business. 2018;16(5):30-36. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2018-5-30-36>. (In Russ.).
27. Nurgalieva AA, Malyshev VL. Selection of a set of hydrodynamic well studies for a reliable forecast of reservoir parameters at the Vishnevskoye field. Oil and Gas Business. 2020;(4):48-57. (In Russ.).
28. Prokofieva AS. Modeling of hydraulic fracturing in a hydrodynamic simulator. Vestnik nauki. 2023;5(62):481-491. <https://www.vestnik-nauki.ru/article/8158>. (In Russ.).
29. Buznikov NA, Istomin VA, Mitnitsky RA. Modeling the dynamics of hydrate inhibitor movement in field pipelines. Gas industry. 2016;(2):94-98. (In Russ.).
30. Kolchin A.V. Analysis of hydrate formation with the use of neural networks. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 30 September – 2 October, New Orleans, Louisiana, USA; 2013 (<https://doi.org/10.2118/167618-STU>).

Информация об авторах

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

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

Альберт Артурович Пашаян – аспирант, Северо-Кавказский федеральный университет, Россия.

Елизавета Гапуровна Керимова – старший преподаватель кафедры нефтегазовой геофизики факультета нефтегазовой инженерии, Северо-Кавказский федеральный университет.

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

Вклад авторов

Абдул-Гапур Гусейнович Керимов. 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.

Альберт Артурович Пашаян. Проведены исследования – сбор интерпретация и анализ полученных данных.

Елизавета Гапуровна Керимова. Проведены исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

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

Information about the authors

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.

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

Albert A. Pashayan – postgraduate student, North-Caucasus Federal University, Russia.

Elizaveta K. Kerimova – Senior Lecturer Head of the Department of Oil and Gas Geophysics, North-Caucasus Federal University, Russia.

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

Author Contributions

Abdul-Gapur G. Kerimov. Conducted the research – collected, interpreted, and analyzed the data. Approval of the final version – accepts responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article, and its final version.

Eldar R. Gasumov. Text preparation and editing, figures – drafting and creating the final manuscript, participating in the scientific design.

Albert A. Pashayan. Conducted the research – collected, interpreted, and analyzed the data.

Elizaveta G. Kerimova. Conducted the research – collected, interpreted, and analyzed the data.

Natalia G. Fedorova. Conducted the research – collected, interpreted, and analyzed the data.



Научная статья
УДК 622.276.1/4.001.57
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.8>

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ НЕФТИ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

Андрей Владимирович Спешилов

ЛУКОЙЛ-Инжиниринг, филиал ПермНИПИнефть в г. Перми
(д. 3А, ул. Пермская, Пермь, 614000, Российская Федерация)
andrey.v.speshilov@lukoil.com; <https://orcid.org/0009-0006-9221-6264>

Аннотация.

В условиях интенсификации добычи высоковязкой нефти и роста стоимости энергоресурсов оптимизация тепловых потоков на установках подготовки скважинной продукции является ключевым фактором снижения эксплуатационных затрат, поскольку перенаправление дефицитного водяного пара на нужды повышения нефтеотдачи требует поиска альтернативных источников тепла для внутренних технологических процессов. Целью настоящей работы является оценка технологической возможности и эффективности полной или частичной замены водяного пара на альтернативный теплоноситель в виде горячей нефтесодержащей жидкости со смежного промысла в блоке входных теплообменных аппаратов. Исследование выполнено с применением методов компьютерного термодинамического моделирования, на основе которых разработана цифровая модель блока кожухотрубных аппаратов со строгой геометрией трубного пучка, а характеристика высоковязких эмульсий проведена по фактическим лабораторным данным разгонки узких фракций. В ходе расчетного анализа доказано, что полная замена пара на нефтесодержащую жидкость невозможна из-за дефицита существующей площади поверхности нагрева, так как переход на однофазную среду из-за высоких вязкостных характеристик нефти приводит к снижению коэффициента теплоотдачи на 45%. Для решения данной проблемы разработан и обоснован комбинированный режим работы блока, предусматривающий совместное использова-

ние двух типов теплоносителей (пар и НСЖ). Предложенная схема позволяет поддерживать нормативную температуру подготовки нефти на уровне 82 °С и одновременно снизить потребление пара на 21 %, что высвобождает объемы энергоресурсов для технологических нужд промысла и логически обосновывает необходимость анализа подобных систем.

Ключевые слова: Подготовка нефти, теплообменный аппарат, площадь поверхности нагрева, термодинамическое моделирование, оптимизация потоков, энергоэффективность, высоковязкая нефть, комбинированный режим, водяной пар, нефтесодержащая жидкость, коэффициент теплоотдачи, водонефтяная эмульсия, характеристика флюидов, энергосбережение, поверочный расчет

Для цитирования: Спешиллов А. В. Повышение энергоэффективности процессов термохимической подготовки нефти путем оптимизации потоков теплоносителей // Наука. Инновации. Технологии. 2026. № 2. С. 177–199. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.8>

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.04.2026;
одобрена после рецензирования 04.06.2026;
принята к публикации 25.06.2026.

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

Energy efficiency improvement in thermochemical oil treatment processes through optimization of heat exchange media flows

Andrey V. Speshilov

PermNIPIneft Branch of LUKOIL-Engineering in Perm (3A Permская St., Perm, 614000,
Russian Federation)
andrey.v.speshilov@lukoil.com; <https://orcid.org/0009-0006-9221-6264>

Abstract.

Under the conditions of high-viscosity oil production intensification and rising energy costs, optimizing heat flows at well production treatment units is a key factor in reducing operational expenditures.

Redirecting scarce water steam for enhanced oil recovery needs requires identifying alternative heat sources for internal technological processes. The paper aims to evaluate technological feasibility and efficiency of complete or partial substitution of water steam with an alternative heat medium, specifically hot oil-containing liquid from an adjacent oilfield, within an inlet heat exchanger block. The study was conducted using computer thermodynamic modeling methods, which served as the basis for developing a digital model of the shell-and-tube heat exchanger block with rigorous tube bundle geometry, while the characterization of high-viscosity emulsions was performed based on actual laboratory data of narrow fraction distillation. The simulation analysis proved that a complete replacement of steam with the oil-containing liquid is impossible due to a deficit in the existing heating surface area. Transitioning to a single-phase medium leads to a 45% decrease in the heat transfer coefficient caused by the high viscosity characteristics of the oil. To address this issue, a combined operation mode of the block was developed and substantiated, providing for the joint utilization of two types of heat exchange media (steam and oil-containing liquid). The proposed scheme ensures stable maintenance of the standard oil treatment temperature at 82°C while simultaneously reducing steam consumption by 21%, which releases significant energy resources for oilfield technological needs and logically justifies the necessity for a deep analysis of such systems.

Keywords: Oil treatment, heat exchanger, heating surface area, thermodynamic modeling, flow optimization, energy efficiency, high-viscosity oil, combined mode, water steam, oil-containing liquid, heat transfer coefficient, oil-water emulsion, fluid characterization, energy saving, rating calculation

For citation: Speshilov A. V. Energy efficiency improvement in thermochemical oil treatment processes through optimization of heat exchange media flows. *Science. Innovation. Technologies.* 2026;(2):177–199. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2026.2.8>

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

The article was submitted 01.04.2026;
approved after reviewing 04.06.2026;
accepted for publication 25.06.2026.

Введение

Разработка месторождений высоковязкой нефти неразрывно связана с применением термических методов воздействия на пласт, требующих больших объемов водяного пара. В условиях роста стоимости энергоресурсов актуальной задачей становится повышение энергоэффективности промысловых объектов. Избыточный расход пара на технологические нужды пунктов подготовки нефти снижает потенциал паронагнетательного фонда скважин и сдерживает темпы добычи сырья. В связи с этим оптимизация тепловых потоков и использование альтернативных источников тепла, таких как горячие технологические потоки, имеет важное практическое значение [1–3]. Главная производственная проблема при реализации подобных мероприятий заключается в изменении гидродинамических и теплофизических условий работы оборудования. Перевод действующих кожухотрубных аппаратов с водяного пара на горячую нефтесодержащую жидкость меняет режим течения сред. Высокая вязкость и обводненность промысловых флюидов ухудшают условия теплопередачи. Возникает противоречие: предприятие располагает тепловым потенциалом альтернативного потока, но фиксированная площадь поверхности существующих аппаратов может оказаться недостаточной для поддержания нормативного режима. При этом точный расчет таких систем классическими методами затруднен из-за нелинейного изменения свойств эмульсий по длине аппарата [4, 5]. Целью исследования является оценка технологической возможности и эффективности перевода блока входных теплообменных аппаратов с парового нагрева на альтернативную нефтесодержащую жидкость со смежного промысла. Для достижения цели решены задачи по созданию геометрической цифровой модели оборудования, определен дефицит площади теплообмена при изменении режимов и разработан оптимальный вариант распределения потоков, обеспечивающий экономию пара при соблюдении целевой температуры подготовки сырья.

Материалы и методы исследований

В качестве объекта исследования рассматривается блок входных теплообменных аппаратов установки подготовки нефти, предназначенный для предварительного термического обез-

воживания и обессоливания высоковязкой водонефтяной эмульсии. Технологическая схема блока состоит из группы параллельно соединенных кожухотрубных теплообменников. Главным дестабилизирующим фактором при анализе работы данного оборудования является высокая вязкость и переменная обводненность обрабатываемого сырья, физико-химические свойства которого существенно изменяются в зависимости от обводненности поступающей скважинной продукции [6].

Инструментом исследования послужили методы компьютерного термодинамического моделирования технологических процессов в специализированном программном комплексе. Расчет фазового равновесия и теплофизических свойств многокомпонентных систем выполнен на основе кубического уравнения состояния.

Характеризация флюидов в среде моделирования, а также задание физико-химических и реологических параметров флюидов в программном комплексе выполнено на основании верифицированных результатов комплексных лабораторных исследований, представленных в отчете о научно-исследовательской работе. Для обеспечения точности термодинамического расчета в модель были заложены лабораторные данные, полученные по стандартизированным отраслевым методикам:

- фракционный состав исследуемой нефти, определенный в соответствии с требованиями ГОСТ 2177-99 и ASTM D 86;
- молекулярная масса фракций, рассчитанная по ОСТ 153-39.2-048-2003;
- плотность сырья, измеренная согласно стандарту ASTM D 5002-99;
- кинематическая и динамическая вязкость сред, определенная по ГОСТ 33-2000.

Математическое моделирование и характеристика нефти проведены для двух базовых технологических потоков на основе индивидуальных лабораторных данных потока № 1 месторождения А и поток № 2 месторождения Б.

Создание системы псевдокomпонентов и аппроксимация свойств высоковязких нефтяных эмульсий осуществлялась с помо-

Input Summary								
Pure Component		Distillation Data		Option				
Initial Temperature: (C)	Whole Crude	Cut 1	Cut 2	Cut 3	Cut 4	Cut 5	Click to Add Cut	
	IBP	IBP	185.0000	200.0000	250.0000	300.0000		
Final Temperature: (C)	FBP	185.0000	200.0000	250.0000	300.0000	FBP		
▶ CutYieldByWt (%)		0.00	3.00	10.00	20.00	67.00		
▶ StdLiquidDensity (kg/m3)	958.3100							
▶ SulfurByWt (%)								
▶ KinematicViscosity (cSt)...	14775.430							
▶ ParaffinsByVol (%)								
▶ PourPoint (C)								
▶ FreezePoint (C)								
▶ CloudPoint (C)								
▶ SmokePt (mm)								
▶ MolecularWeight	496.00							
▶ SaturatesByWt (%)								
▶ AromByWt (%)								
▶ ResinsByWt (%)								
▶ AsphalteneByWt (%)								
◀								

Рис. 1. Задание исходных данных для характеристики нефти на примере Потока № 2.

Fig. 1. Input data generation for oil characterization as illustrated by Flow No. 2.

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

щью специализированного встроенного инструмента характеристики нефти. В процессе интеграции данных в диалоговом окне ввода исходных параметров (рис. 1) в программную среду последовательно вводились экспериментальные данные фракционного состава, а также ключевые физико-химические и реологические свойства компонентов (табл. 1, 2).

Таблица 1. ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ НЕФТИ
Table 1. Fractional composition of oil

№ п/п	Флюид	Фракционный состав					
		Отгоняется, % об. до					
		Т.н.к., °С	100 °С	150 °С	200 °С	250 °С	300 °С
1	Поток № 1	187	—	—			
2	Поток № 2	180	—	—	3	10	20

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

Таблица 2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕФТИ ПРИ СТАНДАРТНЫХ УСЛОВИЯХ
Table 2. Physicochemical properties of oil under standard conditions

№ п/п	Флюид	Молекулярная масса, г/моль	Плотность, кг/м³	Вязкость, мПа*С
1	Поток № 1	465	945,03	7757
2	Поток № 2	496	958,31	14159,44

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

На основе введенных исходных данных в программной среде проведена характеристика нефти, результаты которой представлены на рисунке 2. В таблицах 3 и 4 приведено сравнение расчетных параметров флюида с заданными характеристиками, использованными при создании модели.

Results Summary		Pure Component	Distillation	Property Table	⚠ Message		
Initial Temperature: (C) Final Temperature: (C)	Whole Crude	Cut 1	Cut 2	Cut 3	Cut 4	Cut 5	Click to Add Cut
	IBP	IBP	185.0000	200.0000	250.0000	300.0000	
	FBP	185.0000	200.0000	250.0000	300.0000	FBP	
▶ CutYieldByWt (%)	100.00	0.00	3.00	10.00	20.00	67.00	
▶ StdLiquidDensity (kg/m3)	958.3100	899.5604	905.1262	921.9900	942.1495	971.5560	
▶ SulfurByWt (%)							
▶ KinematicViscosity (cSt)...	14775.430	11.465	15.476	51.524	532.858	626630.930	
▶ ParaffinsByVol (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
▶ PourPoint (C)	123.096	9.932	12.941	24.821	44.807	130.701	
▶ FreezePoint (C)	68.615	18.756	23.576	38.548	56.593	79.211	
▶ CloudPoint (C)	13.051	-60.570	-55.523	-38.187	-17.778	19.082	
▶ SmokePt (mm)	0.01	7.04	6.41	4.55	2.68	0.00	
▶ MolecularWeight	496.00	284.55	296.68	341.11	415.13	587.71	
▶ SaturatesByWt (%)							
▶ AromByWt (%)	94.124	74.777	76.403	81.926	89.274	98.187	
▶ ResinsByWt (%)							
▶ AsphalteneByWt (%)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
▶ ConradsonCarbonByWt...	0.471	0.000	0.000	0.000	0.000	0.703	

Рис. 2. Охарактеризованная нефть на примере нефти скважины №2.

Fig. 2. Characterized oil properties as illustrated by Flow No. 2.

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

Таблица 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ НЕФТИ
(фракционный состав)
Table 3. Oil characterization results (fractional composition)

Поток № 1							
		н.к - к.к	н.к- 185	185– 200	200– 250	250– 300	300 - к.к.
Выход фракции, % об	Модель	100	0	4	8	20	68
	Лаб. данные	100	0	4	8	20	68
Поток № 2							
		н.к - к.к	н.к- 187	187– 200	200– 250	250– 300	300– к.к.
Выход фракции, % об	Модель	100	0	3	10	20	67
	Лаб. данные	100	0	3	10	20	67

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

Таблица 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ НЕФТИ
(ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА)
Table 4. Oil characterization results (physicochemical properties)

№ п/п	Флюид		Молекулярная масса, г/моль	Плотность, кг/м³	Вязкость, мПа*С
1	Поток №1	Модель	465	945,03	7757
		Лаб. данные	465	945,03	7757
2	Поток №2	Модель	496	958,31	14159,44
		Лаб. данные	496	958,31	14159,44

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

После характеристики флюидов выполнено математическое моделирование и настройка работы входного теплообменного оборудования установки подготовки нефти.

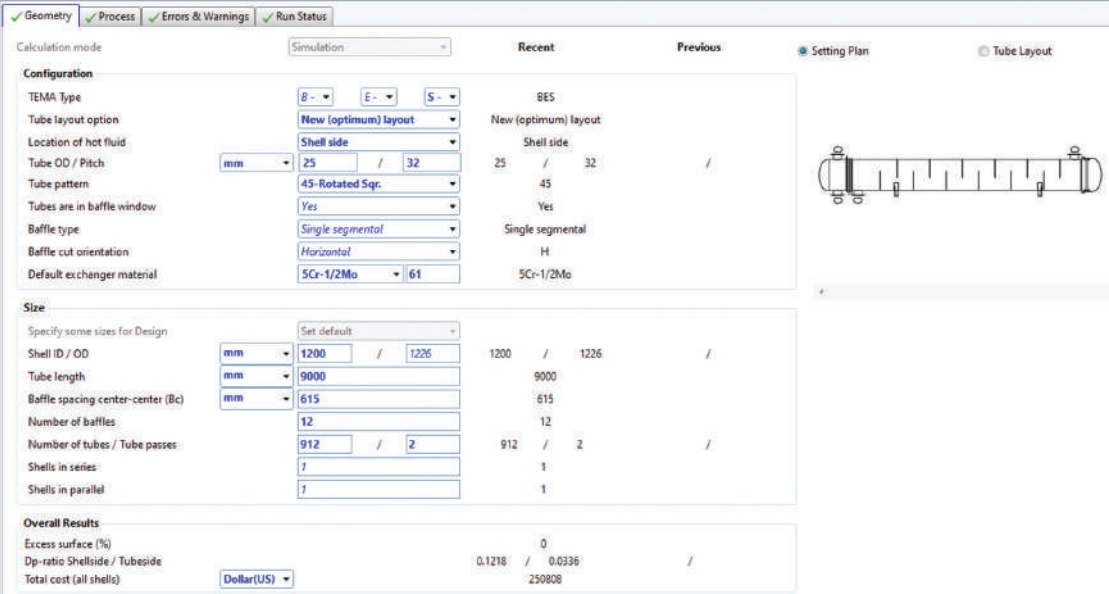


Рис. 3. Детальное задание теплообменного аппарата.
Fig. 3. Detailed heat exchanger unit configuration.

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

Для детального описания процессов теплопередачи в программном комплексе задействована строгая геометрическая модель теплообменных аппаратов (рис. 3). В расчетный модуль интегрированы точные конструктивные параметры, включая габаритные размеры корпуса (сосуда) и трубного пучка, а также общее количество, диаметр, толщину стенки, шаг и пространственное расположение трубок в пучке.

Настройка модели блока теплообменников (рис. 4) осуществлялась с учетом реального распределения материальных потоков нагреваемого потока № 1 и теплоносителя на два параллельно функционирующих аппарата. Текущее техническое состояние поверхностей нагрева учитывалось путем задания коэффициента эксплуатационного загрязнения (Fouling Resistance). Расчет данного параметра производился на основе ретроспективного анализа исторических технологических данных [7].

Процесс калибровки модели был осложнен неполной оснащенностью действующего промышленного объекта приборами КИПиА. В массиве исторических эксплуатационных данных отсутствовали прямые измерения следующих критических величин:

- температура потока № 1 на входе в теплообменники;
- температура греющего водяного пара на выходе из межтрубного пространства;
- выходные давления потоков потока № 1 и греющего пара.

В связи с дефицитом измерительной информации настройка цифровой модели выполнялась на основе ограниченного набора доступных параметров с применением метода обратного расчета. Основной принцип обратного расчета заключается в следующем: неизвестные параметры определяются путем подбора таким образом, чтобы расчетные выходные характеристики совпадали с доступными измеряемыми данными. В качестве главного целевого критерия (индикатора сходимости модели) выступала фактическая температура нагретого потока № 1 на выходе из аппаратов.

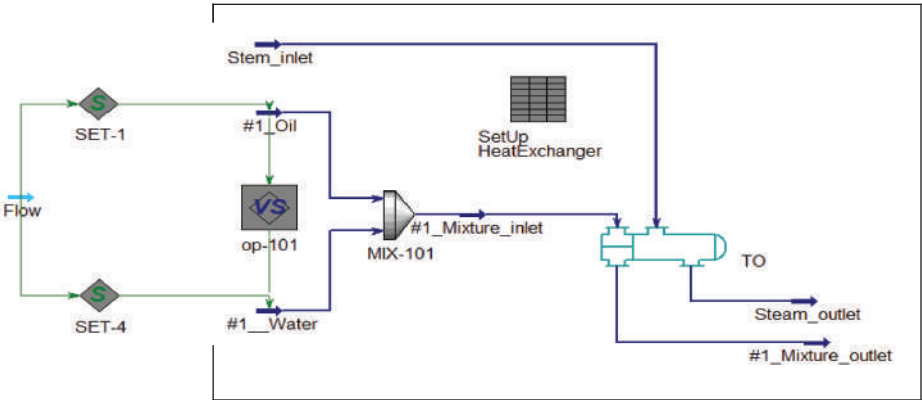


Рис. 4. Расчетная модель теплообменного аппарата в среде программного комплекса.
Fig. 4. Heat exchanger simulation model within the software environment.
Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Таблица 5. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ НАСТРОЙКИ МОДЕЛИ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ (РЕЖИМЫ 1–13)

Исходные данные						
Название режимных показателей		P. 1	P. 2	P. 3	P. 4	
Пар	Давление, МПа	1,11	1,11	1,11	1,11	
	Температура, °C	186	186	186	186	
	Расход, т/ч	28,5	28,5	28,5	28,5	
Поток № 1	Давление, МПа	0,41	0,42	0,4	0,41	
	Обводненность, %	85	85	85	85	
	Расход, м³/ч	649	649	616	621	
	Выход. температура, °C	83	83	84	83	
Результаты модели						
Поток № 1	Вход. температура, °C	55,6	54,5	55,2	54,4	
	Выход. давление, МПа	0,39	0,40	0,38	0,39	

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

Для автоматизации процедуры обратного расчета использовался специализированный математический инструмент численной подстройки параметров. С его помощью определялась неизвестная температура сырьевой НСЖ на входе в теплообменник. При проведении калибровочных расчетов базовые параметры сред принимались согласно режимному листу: обводненность потока № 1 составляла 85 %, а давление греющего пара на входе в блок равнялось 1,11 МПа. Полный перечень исходных параметров и результаты верификации модели представлены в таблице 5.

Полученные расчетные значения (температура потока № 1 на входе в блок и давление на выходе из него) составили от 50 до 70 °С и от 0,2 до 0,4 МПа соответственно. Данные результаты полностью соответствуют предельным технологическим границам, установленным действующим производственным регламентом.

Table 5. Input data and heat exchanger model calibration results
(Cases 1–13)

	P. 5	P. 6	P. 7	P. 8	P. 9	P. 10	P. 11	P. 12	P. 13
	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
	186	186	186	186	186	186	186	186	186
	28,2	28,2	28,5	28,5	28,2	28,2	28,2	28,2	28,5
	0,41	0,41	0,4	0,41	0,41	0,42	0,41	0,41	0,38
	85	85	85	85	85	85	85	85	85
	671	654	640	683	672	694	681	657	673
	84	84	84	83	83	84	82	84	85
	57,8	57,1	56,3	57,0	56,8	58,7	56,1	57,2	57,7
	0,39	0,39	0,38	0,38	0,39	0,39	0,38	0,39	0,35

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование возможности перевода блока теплообменников с пара на альтернативный поток горячей нефтяной эмульсии потребовало проведения поверочных расчетов площади нагрева. Параметры входящих материальных потоков, использованные при моделировании, обобщены в таблице 6.

Таблица 6. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЛОЩАДИ ТЕПЛООБМЕНА ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ
Table 6. Input data for heat exchanger surface area calculation

Флюид	Параметр	Значение
Поток № 1	Расход, м³/ч	1291,7
	Обводненность, %	85–88
	Вход. температура, °С	52–55
	Выход. температура, °С	82–85
Поток № 2	Расход, м³/ч	416,6
	Обводненность, %	81–84
	Вход. температура, °С	102–105
	Выход. температура, °С	92–95

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

Выбор расчетного сценария обусловлен необходимостью создания запаса по площади теплообменной поверхности, в связи с чем моделирование выполнялось по наихудшим эксплуатационным условиям. Для нагреваемой сырьевой эмульсии (поток № 1) принята максимальная обводненность 88 %, характеризующаяся наибольшей теплоемкостью, что существенно осложняет процесс нагрева. Для альтернативного греющего потока нефтесодержащей жидкости (поток № 2) задавалась минимальная обводненность 81 %, соответствующая сценарию с наименьшим располагаемым теплосодержанием. На входе в блок (рис. 5) для потока № 1 были установлены параметры 52 °С и 0,4 МПа; для потока № 2 — 102 °С и 0,4 МПа. Расчет проводился при условии равномерного распределения общего объема жидкости на три параллельно функционирующих аппарата.

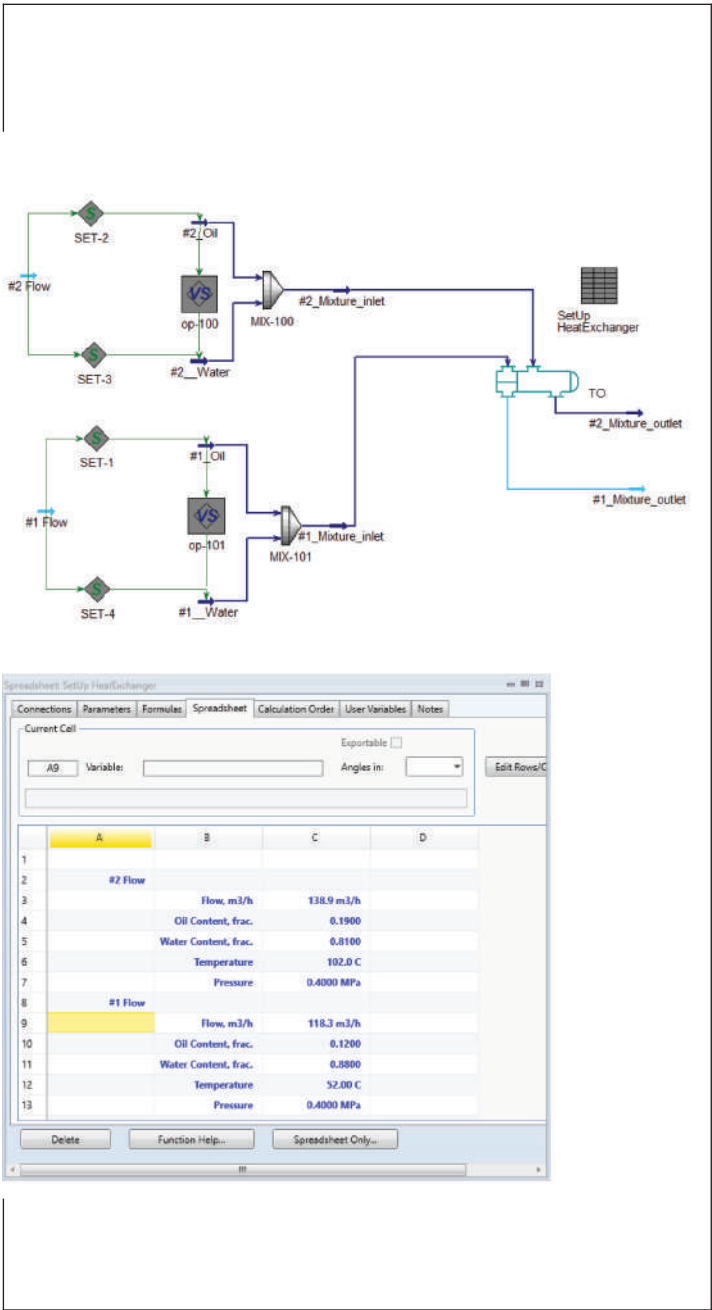


Рис. 5. Задание данных для расчета площади теплообмена теплообменного оборудования.

Fig. 5. Data input for heat exchanger surface area calculation.

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

По результатам компьютерного моделирования установлено, что существующая эффективная площадь теплообмена одного аппарата, составляющая 624,9 м², является недостаточной. В заданных жестких условиях она физически не способна обеспечить нагрев потока № 1 до регламентных 82 °С и охлаждение потока № 2 до целевых 92 °С. Сводные данные термодинамического расчета представлены в табл. 7.

Таблица 7. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА
Table 7. Calculation results

Объект	Параметр	Значение
Поток № 1	Расход, м³/ч	430,5
	Обводненность, %	88,0
	Вход. температура, °С	52,0
	Выход. температура, °С	65,0
	Вход. давление, МПа	0,4
	Выход. давление, МПа	0,39
Поток № 2	Расход, м³/ч	138,9
	Обводненность, %	81,0
	Вход. температура, °С	102,0
	Выход. температура, °С	59,8
	Вход. давление, МПа	0,4
	Выход. давление, МПа	0,39
Теплообменный аппарат	Эффективная площадь теплообмена, м²	624,9
	Полная площадь теплообмена, м²	644,7

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

Главной физико-химической причиной выявленной неэффективности является резкое изменение условий теплоотдачи на границе раздела фаз при смене типа агента. При эксплуатации теплообменников на водяном паре за счет интенсивного процесса конденсации достигаются высокие значения коэффициента теплоотдачи – до $3774,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$. В случае замены пара на нефтесодержащую жидкость расчетный коэффициент теплоотдачи снижается до $2076,9 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$, что обусловлено более низкими теплофизическими свойствами нефтяной фазы и ее высокой вязкостью. Таким образом, перевод блока исключительно на нагрев технологическими потоками нефти со смежного промысла невозможен без капитальной реконструкции или полной замены теплообменного блока [8–11].

Частичное использование тепла технологических потоков для снижения общего расхода пара на нагрев сырья возможна при внедрении оптимизационных сценариев с распределением объемов нагреваемой эмульсии по аппаратам блока в зависимости от вида теплоносителя. Расчет оптимизационных режимов выполнен по описанной выше методике наихудших условий с сохранением ранее принятых базовых параметров температур, давления и обводненности сред.

Параметрический анализ в среде моделирования позволил последовательно оценить четыре конфигурации работы технологического блока:

- Режим 1: в работе находятся 2 аппарата (оба используют водяной пар, линии нефтесодержащей жидкости со смежного промысла отключены);
- Режим 2: в работе находятся 3 аппарата (2 используют пар, 1 переведен на работу с нефтесодержащей жидкостью);
- Режим 3: в работе находятся 4 аппарата (2 используют пар, 2 переведены на работу с нефтесодержащей жидкостью);
- Режим 4: в работе находятся 5 аппаратов (2 используют пар, 3 переведены на работу с нефтесодержащей жидкостью).

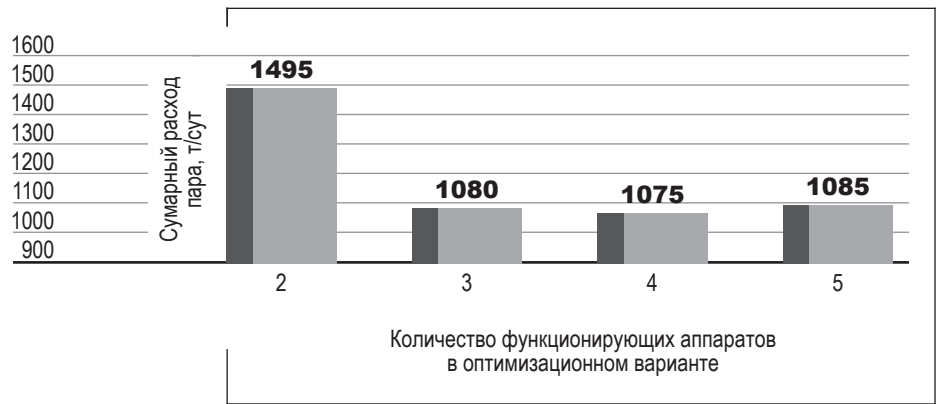


Рис. 6. Сравнение расхода пара оптимизационных вариантов.
Fig. 6. Steam consumption comparison across optimized variants.
Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Таблица 8. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ВАРИАНТА ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Теплоноситель: пар					
Поток № 1			Пар		
Расход, м³/ч	Вход. Темпе ратура, °С	Выход. Темпе ратура, °С	Расход, м³/ч	Вход. Темпе ратура, °С	Выход. Темпе ратура, °С
Количество работающих теплообменных аппаратов: 2 (2 с паром, 0 с НСЖ)					
645,9	52	82	31,14	186	70,85
Количество работающих теплообменных аппаратов: 3 (2 с паром, 1 с НСЖ)					
466,5	52	82	22,5	186	71,4
Количество работающих теплообменных аппаратов: 4 (2 с паром, 2 с НСЖ)					
462,5	52	82	22,3	186	71,4
Количество работающих теплообменных аппаратов: 5 (2 с паром, 3 с НСЖ)					
468,4	52	82	22,6	186	81,3

Примечание: Результаты представлены для одного теплообменника с одним типом теплоносителя.
Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

На основе сопоставления полученных данных установлено, что наиболее сбалансированным является Режим 2 (конфигурация «2 паровых + 1 аппарат на нефтесодержащей жидкости»). При данном сценарии достигается целевая регламентная температура нагрева сырья на выходе из блока (82 °С), а суммарный расход водяного пара снижается до 1080 т/сут (21% от текущих расходов) (рис. 6). Стоит отдельно отметить, что во всех четырех расчетных конфигурациях конечная температура охлаждения греющей нефтесодержащей жидкости опускалась ниже требуемого проектного диапазона 92–95 °С. Подробные результаты моделирования всех оптимизационных сценариев представлены в таблице 8.

Table 8. Performance evaluation results for the optimized heat exchanger variants

	Теплоноситель: НСЖ					
	Поток № 1			Поток № 2		
	Расход, м³/ч	Вход. Темпе- ратура, °С	Выход. Темпе- ратура, °С	Расход, м³/ч	Вход. Темпе- ратура, °С	Выход. Темпе- ратура, °С
	—	—	—	—	—	—
	358,8	52	82	416,7	102	75,2
	183,4	52	82	208,3	102	74,5
	118,3	52	82	138,9	102	74,8

Заключение

В рамках работ по изменению греющего агента входных теплообменных аппаратов цеха подготовки и перекачки нефти выполнено математическое моделирование работы блоков ТО-1–5. По результатам проведенного исследования сформированы следующие ключевые выводы:

- На основе лабораторных данных фракционного состава успешно выполнена характеристика технологических флюидов. С учетом паспортных характеристик сосудов и трубных пучков настроена цифровая модель теплообменного оборудования, адекватная реальному промышленному объекту.
- Проведенные поверочные расчеты площади поверхности нагрева аппаратов ТО-1–5 показали невозможность полного перевода блока на альтернативный греющий поток. Существующая конфигурация теплообменников не способна обеспечить нагрев сырьевой нефтесодержащей жидкости до регламентных 82 °С при входящей температуре 52 °С в режиме трех параллельно работающих аппаратов, использующих вместо пара нефтесодержащую жидкость со смежного месторождения.
- Главной причиной неэффективности полной замены сред является падение коэффициента теплоотдачи на 45 % (с 3774,5 до 2076,9 Вт/м²·К) из-за более низких теплофизических свойств и высокой вязкости нефтяной эмульсии по сравнению с конденсирующимся водяным паром.
- В качестве альтернативы обоснован комбинированный оптимизационный вариант с распределением потоков сырья по блоку нагрева в зависимости от вида используемых сред. Численное моделирование подтвердило, что режим одновременной работы трех аппаратов (двух на паре и одного на нефтесодержащей жидкости) позволяет снизить расход технологического пара до 1080 т/сут (21% от текущих расходов) при сохранении целевой температуры нагрева сырья (82 °С).

Список источников

1. Stoitsits R. F., Bashagour H. M., Su C. G. Application of Integrated Production and Reservoir Modeling to Optimize Deep-water Development // International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. SPE, 2010. SPE-131621-MS. <https://doi.org/10.2118/131621-MS>.
2. Awan E., Aboaja U., Ajayi A. Integrated Production System Modelling (IPSM) as an Opportunity Realization and Optimization Tool for Improved Asset Management // SPE Nigeria International Conference and Exhibition. SPE, 2013. SPE-167557-MS.
3. Salaudeen I., Bopbekov D., Abdulkarim A. Optimization of Petroleum Production System using Nodal Analysis Program // 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. <https://doi.org/10.2118/9781613995648>
5. Некипелов Ю. В., Латкин К. Е., Исмагилов Р. Р. и др. Развитие интегрированного проектирования в ОАО «НК «Роснефть» // Нефтяное хозяйство. 2010. № 8. С. 6–9.
6. Ли Д., Никенс Г., Уэллс М. Эксплуатация обводняющихся газовых скважин. Технологические решения по удалению жидкости из скважин / Пер. с англ. М.: Премиум Инжиниринг, 2008. 384 с.
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.
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 // Journal of Petroleum Technology. 1985. Vol. 37. No. 10. P. 1751–1763.
10. Dale B. H. Production Optimization using Nodal Analysis. Tulsa: OGCI Publications, 1991. 411 p.
11. Al-Safran E. M., Brill J. P. Applied Multiphase Flow in Pipes and Flow Assurance: Oil and Gas Production. Society of Petroleum Engineers, 2017. 358 p.

References

1. Stoisits RF, Bashagour HM, Su CG. Application of Integrated Production and Reservoir Modeling to Optimize Deepwater Development. International Oil and Gas Conference and Exhibition in China. SPE; 2010. SPE-131621-MS. <https://doi.org/10.2118/131621-MS>.
2. Awan E, Aboaja U, Ajayi A. Integrated Production System Modelling (IPSM) as an Opportunity Realization and Optimization Tool for Improved Asset Management. SPE Nigeria International Conference and Exhibition. SPE; 2013. SPE-167557-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. <https://doi.org/10.2118/9781613995648>
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 HW, Wells M. The operation of the watering gas wells. Technological solutions for removing fluid from wells, transl. 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 doi.org
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 EM, Brill JP. Applied Multiphase Flow in Pipes and Flow Assurance: Oil and Gas Production. Society of Petroleum Engineers; 2017. 358 p.

Информация об авторе

Андрей Владимирович Спешиллов – ведущий инженер филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИНефть» в г. Перми, Researcher ID: IQV-2729-2023.

Information about the author

Andrey V. Speshilov – Leading Engineer of the PermNIPIneft Branch of LU-KOIL-Engineering LLC in Perm, Researcher ID: IQV-2729-2023.



НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал
Северо-Кавказского федерального
университета

ISSN 2308–4758

Выпуск № 2, 2026 г.



Издательство Северо-Кавказского федерального
университета. г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1.

Корректор – М.И. Толмачев.
Компьютерная вёрстка – О.Г. Полевич.

Подписано в печать 29.06.2026 г. Выход в свет 10.07.2026 г.
Формат 70 × 108 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага
офсетная. Усл. печ. л. 17,50. Тираж 1 000 экз. Цена 534 руб.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет».
355029, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2.