

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, 2025 г.

Выходит 4 раза в год

	«Наука. Инновации. Технологии» (Nauka. Innovatsii. Tekhnologii) Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета
Журнал	«Наука. Инновации. Технологии» – рецензируемый научный журнал открытого доступа, публикующий работы по направлениям исследований «Науки о Земле».
Цель журнала:	интеграция, развитие и продвижение современных и актуальных проблем наук о Земле посредством публичного обсуждения исследований высокого уровня в целях применения полученных научных знаний на практике для решения глобальных и локально-региональных проблем устойчивого развития.
Разделы журнала:	технические науки (геология, поиски, разведка нефтяных и газовых месторождений; технология бурения и освоения скважин; разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений); географические науки (физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов; экономическая, социальная, политическая и рекреационная география; геоинформатика, картография; геоэкология); физико-математические науки (науки об атмосфере и климате).
ISSN	2308–4758
DOI	https://doi.org/10.37493/2308-4758.0
Журнал	зарегистрирован в Роскомнадзоре (ПИ № ФС77–52723 от 8.02.2013).
Выходит	4 раза в год.
Дата выхода	первого номера: 25.02.2013.
Дата выхода	текущего номера: 30.06.2025.
Сведения о переименовании:	журнал «Наука. Инновации. Технологии» образован в 2012 году в результате перерегистрации журнала «Вестник Ставропольского государственного университета» в связи с переименованием учредителя.
Тираж	1000 экз.
Индекс	94011 «Объединённый каталог. ПРЕССА РОССИИ. Газеты и журналы». Включен в БД «Российский индекс научного цитирования», перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.
Учредитель	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет».
Адрес редакции и издателя:	355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1. Телефон: (8652) 33-07-32; E-mail: nit_ncfu@mail.ru ; сайт: https://scienceit.elpub.ru/jour
Адрес издательства	Научной библиотеки ФГАОУ ВО «СКФУ»: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1.
Адрес типографии:	типография ФГАОУ ВО «СКФУ», 355029, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2.
	Материалы журнала открытого доступа в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License, которая разрешает их использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии правильного цитирования оригинальной работы.
Авторское право	на оригинал-макет и оформление принадлежит журналу, авторское право на статьи – авторам.

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

Ministry of Science and Higher Education
of the Russian Federation

SCIENCE. INNOVATIONS. TECHNOLOGIES

Scientific journal
of North-Caucasus Federal
University

ISSN 2308–4758
DOI: 10.37493/2308-4758.0



No. 2, 2025

Published quarterly

	“Science. Innovations. Technologies” Scientific journal of North-Caucasus Federal University
Journal	“Science. Innovations. Technologies” is an open access peer-reviewed journal that publishes the results of scientific research in Earth sciences.
The aim of the journal	is to integrate, develop and promote topical issues in the Earth sciences through public discussion of high-level research in order to apply the scientific knowledge in practice to solve global and local-regional problems of sustainable development.
Section policies:	technical sciences (geology, prospecting, exploration of oil and gas fields, technologies of drilling and development of wells, development and operation of oil and gas fields); geographical sciences (physical geography and biogeography, soil geography and landscape geochemistry; economic, social, political and recreational geography, geoinformatics, cartography and geoecology); physical and mathematical sciences (atmospheric and climate sciences).
ISSN	2308–4758. https://doi.org/10.37493/2308-4758.0
The journal is	the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology registered by and Mass Media (Roskomnadzor) (Certificate on Registration PI No. FS77–52723 of February 8, 2013).
Published quarterly Publication date	of the first issue: 02.25.2013.
Publication date Information on renaming:	of the current issue: 30.06.2025 the journal “Science. Innovations. Technologies” was established in 2012 following the re-registration of the journal “Bulletin of the Stavropol State University” due to renaming of the founder.
Circulation:	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, 2024

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

СОДЕРЖАНИЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 2, 2025

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

1.6.12	ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ	
	В. В. Разумов, Н. В. Разумова, Н. В. Кондратьева Автомобильные дороги Карача- ево-Черкесской Республики под воздействием оползневых процессов	11
	V. V. Razumov, N. V. Razumova, N. V. Kondratyeva Highways of the Karachay-Cher- kess Republic under the influence of landslide pro- cesses	12
	Т. В. Дегтярева Формирование микроэлементно- го состава почв Ставропольского края под воз- действием процессов переувлажнения	63
	T. V. Degtyareva Formation of microelement compo- sition of soils of Stavropol krai under the influence of waterlogging processes	64

А. З. Керевов,**Ю. П. Костин,****Р. С. Губанов**

Геозоологическая характеристика
ихтиофауны водных объектов Кубанского
речного бассейна (на материалах Карачаево-
Черкесской Республики) 61

A. Z. Kerefov,**Yu. P. Kostin,****R. S. Gubanov**

Geozoological characteristics of
the ichthyofauna of the water bodies of the Kuban
river basin (based on the materials of the Kara-
chay-Cherkess Republic) 62

1.6.13. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ,
СОЦИАЛЬНАЯ,
ПОЛИТИЧЕСКАЯ И
РЕКРЕАЦИОННАЯ
ГЕОГРАФИЯ
(ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ НАУКИ)

И. П. Супрунчук,**Г. Н. Жиренко,****А. А. Савченко**

Этнодемографические факторы
развития террористической деятельности в Су-
дано-Сахельском регионе 81

I. P. Suprunchuk,**G. N. Zhirenko,****A. A. Savchenko**

Ethnodemographic factors of ter-
rorist activity development in the Sudan-Sahel re-
gion. 82

1.6.18. НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ
И КЛИМАТЕ (ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ)

И. С. Афанасьев, Б. А. Ашабоков

О результатах тестирования не-
которых алгоритмов расчета коагуляционных
процессов в дисперсных системах 113

I. S. Afanasyev, B. A. Ashabokov

On the results of testing some algo-
rithms for calculating coagulation processes in dis-
persed systems 114

Ю. Л. Смерек, Г. Х. Бадахова,

В. И. Волкова, М. В. Барекова

Повторяемость жарких дней на
Ставрополье в условиях современного клима-
та 135

Yu. L. Smerek, G. Kh. Badakhova,

V. I. Volkova, M. V. Barekova

Recurrence of hot days in the Stav-
ropol krai under current climate conditions. 136

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

2.8.4. РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ
НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

В. С. Кулешов, Б. Н. Недомовный,

А. Ю. Кудымов, Н. А. Распутин,

Н. Ю. Юрьева

Влияние анизотропии на упругие
свойства горной породы 153

V. S. Kuleshov, B. N. Nedomovnyi, A. Ju. Kudymov, N. A. Rasputin, N. Ju. Yurieva The effect of anisotropy on the elastic properties of rock	154
Р. А. Нещадимов Разделение добычи и закачки на участках совместной разработки двух и более пластов	175
R. A. Neshchadimov Allocation of production and injection in areas of commingled production of two or more reservoirs	176



Научная статья
УДК 551.435.627(470.638)
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.1>

АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ КАРАЧАЕВО- ЧЕРКЕССКОЙ РЕСПУБЛИКИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ

Виктор Владимирович Разумов^{1*},
Наталья Викторовна Разумова²,
Наталья Владимировна Кондратьева³

- ^{1,3} Высокогорный геофизический институт Росгидромета (д. 2, пр. Ленина, Нальчик, 360030, Российская Федерация)
² Российские космические системы Роскосмоса (д. 53, ул. Авиаторная, Москва, 111250, Российская Федерация)
¹ razumov_vv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8099-6976>
² razumova-nv@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3266-7494>
³ kondratyeva_nat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7313-4489>
* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Объектом исследования является оползневая деятельность на автомобильных дорогах, проходящих по территории Карачаево-Черкесской Республики. В работе представлены результаты систематизации и анализа различных источников, содержащих информацию об опасности активизации оползневых процессов на автомобильных дорогах Карачаево-Черкесской Республики за 2005–2023 гг. Охарактеризованы условия и причины, оползневых проявлений на дорогах республики, определена роль природного и техногенного факторов в развитии данного процесса. Максимальное число случаев оползневой активизации на дорогах республики приурочено к весенне-летнему периоду и в основном обусловлено обильными атмосферными осадками. За изучаемые 19 лет зафиксировано более 100 значимых оползневых проявлений, причинивших ущерб автомобильным дорогам, проходящим по 10 административным районам республики. Только за период 2010–2023 гг. оползневыми процессами было деформировано (повреждено или разрушено) 6,816 км дорог, из них: 4,057 км дорог с твердым покрытием и 2,759 км дорог без покрытия. Большинство участков дорог, где произошли оползневые деформации, расположены в Карачаевском и Усть-Джегутинском районах республики. Относительно высокий уровень оползневой активности на дорогах республики отмечался в 2016–2018 гг. Объем наиболее катастрофических оползневых подвижек вблизи автодорог иногда достигал 1–2 млн м³.

Выявлены участки дорог, где оползневые активизации периодически наблюдались в разные годы. Приведены сведения о местоположении оползневых проявлений, активности и масштабах произошедших деформаций полотна дорог в разных районах республики. Анализ социально-экономических последствий произошедших оползневых активизаций позволяет сделать вывод о значительной степени их опасности для автомобильной сети на территории Карачаево-Черкесской Республики.

Ключевые слова: оползни, оползневые проявления, активизация, деформация, автомобильная дорога, дорожное полотно

Для цитирования: Разумов В. В., Разумова Н. В., Кондратьева Н. В. Автомобильные дороги Карачаево-Черкесской Республики под воздействием оползневых процессов // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 2 С. 11–40. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.1>

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

Статья поступила в редакцию 31.03.2025;
одобрена после рецензирования 16.05.2025;
принята к публикации 16.06.2025.

1.6.12. Physical Geography and Biogeography, Soil Geography and Landscape Geochemistry (Geographical Sciences) Research article

Highways of the Karachay-Cherkess Republic under the influence of landslide processes

Viktor V. Razumov^{1*},
Natalia V. Razumova²,
Nataliya V. Kondratyeva³

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

² Russian Space Systems of Roscosmos (53, Aviamotornaya St., Moscow, 111250, Russian Federation)

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

² razumova-nv@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3266-7494>

³ kondratyeva_nat@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7313-4489>

* Corresponding author

Abstract.

The object of the study is landslide activity on highways passing through the territory of the Karachay-Cherkess Republic. The paper presents the results of systematization and analysis of various sources containing information on the danger of landslide activation on the highways of the Karachay-Cherkess Republic for 2005–2023. The conditions and causes of landslide manifestations on the roads of the republic are characterized, the role of natural and man-made factors in the development of this process is determined. The maximum number of cases of landslide activation on the roads of the republic is timed to the spring-summer period and is mainly due to heavy precipitation. Over the past 19 years, more than 100 significant landslide occasions have been recorded, causing damage to highways passing through 10 administrative districts of the republic. In the period 2010–2023 alone, 6,816 km of roads were deformed (damaged, destroyed) by landslide processes, including 4,057 km of paved roads and 2,759 km of unpaved roads. Most of the road sections where landslide deformations occurred are located in the Karachayevsky and Ust-Dzhegutinsky districts of the republic. A relatively high level of landslide activity on the roads of the republic was noted in 2016–2018. The volume of the most catastrophic landslide movements near highways sometimes reached 1–2 million m³. The sections of roads where landslide activations were periodically observed in different years have been identified. Information is provided on the location of landslide manifestations, activity, and the extent of deformations of the roadway in different regions of the republic. The analysis of the socio-economic consequences of the landslide activations allows us to conclude that they are quite dangerous for the automobile network in the territory of the Karachay-Cherkess Republic.

Keywords: landslides, landslide manifestations, activation, deformation, highway, roadway

For citation: Razumov VV, Razumova NV, Kondratyeva NV. Highways of the Karachay-Cherkess Republic under the influence of landslide processes. *Science. Innovations. Technologies*. 2025;(2):11-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.1>

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

The article was submitted 31.03.2025;
approved after reviewing 16.05.2025;
accepted for publication 16.06.2025.

Введение

Карачаево-Черкесская Республика расположена на юге Российской Федерации. Граничит на севере со Ставропольским краем, на западе – с Краснодарским краем, на востоке – с Кабардино-Балкарской Республикой, на юге – с Грузией и Абхазией. В состав республики входят 10 административных районов и 2 города республиканского подчинения. На ее территории расположено 149 населенных пунктов, из них 4 города, 7 поселков городского типа и 138 сельских населенных пунктов. Столицей республики является город Черкесск.

В пределах республики выделяются три высотные зоны (равнинная, предгорно-низкогорная и средне-высокогорная), которые характеризуются сложным геологическим и геоморфологическим строением [1-3, 5-7]. Разнообразие и сложность форм рельефа в сочетании с климатическими условиями предопределяют развитие на территории Карачаево-Черкессии широкой гаммы опасных склоновых процессов (лавины, сели, оползни, обвалы и осыпи и др.). Значительная часть территории республики, причем в достаточно освоенных зонах, подвержена активному воздействию оползневых процессов.

Под оползнями, согласно СП 116.13330.2012. Свод правил. «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003» (утв. Приказом Минрегиона России от 30.06.2012, № 274; ред. от 30.12.2020), понимается смещение горных пород со склонов, бортов карьеров, строительных выемок под действием веса грунта и объемных и поверхностных сил. Условия, причины образования и опасность проявления оползневых процессов общеизвестны и подробно описаны в научной литературе.

Активные оползневые формы в основном характерны для уступов высоких речных террас и междуречий рек Кубань, Большой и Малый Зеленчук, расположенных в равнинной и предгорно-низкогорной зонах (Абазинский, Адыге-Хабльский, Ногайский, Прикубанский и Хабезский районы). Значительное развитие оползневые процессы получили в низко-среднегорных частях бассейнов рек Уруп, Большой и Малый Зеленчук, Кубань, Кума и Подкумок (Урупский, Усть-Джегутинский, Карачаевский, Малокарачаевский, Зеленчукс-

кий, Хабезский районы). Единичные оползневые проявления наблюдаются в высокогорной зоне Карачаевского и Зеленчукского районов (бассейны рек Теберда, Большой и Малый Зеленчук) [7–13].

Оползневая активизация на территории республики вызывается чаще всего природными (атмосферные осадки, боковая эрозия рек (р.), близкое залегание грунтовых вод) и техногенными (подрезка склонов, передвижение тяжелого автотранспорта и др.) факторами и происходит в основном в весенне-летний период года [7–12]. Проведенный нами ранее анализ оползневой активности на территории республики показал [4, 5], что характер оползневой деятельности на территории республики значительно различается по годам и в разных районах Карачаево-Черкессии. Наибольшая пораженность оползневыми процессами отмечается вдоль участков линейных сооружений (линии электропередачи, газопроводы, автомобильные дороги).

Строительство, реконструкция и эксплуатация довольно густой сети автомобильных дорог (а/д) в предгорных и горных районах республики сопровождается подрезками неустойчивых склонов и складированием в пределах низовых откосов дорог рыхлообломочного материала, что провоцирует активизацию оползневых процессов. Значительное влияние на устойчивость оползневых склонов могут оказывать динамические нагрузки от транспорта, ударно-вибрационных механизмов и взрывных работ. Во многих случаях именно техногенное вмешательство служит толчком к развитию оползневых процессов на участках автодорог, где активизация этих процессов ранее не наблюдалась, а метеофакторы в этих условиях являются триггерным (спусковым) механизмом процесса.

Сеть автомобильных дорог на территории республики довольно протяженная и, в горных районах проложена в основном вдоль наиболее заселенных долин основных ее рек (Большой и Малый Зеленчук, Теберда, Кубань и др.) (рис. 1). По территории республики проходят автомобильные дороги федерального значения: А165 Лермонтов – Черкесск, А155 Черкесск – Домбай – граница с Республикой Абхазия, А156 подъездная дорога от автомобильной дороги А-155 Черкесск – Домбай – граница с Республикой Абхазия к международному центру отдыха «Архыз» и к специализированной астрофизической обсерватории Российской академии наук. Со-

гласно паспорта региона Российской Федерации «Карачаево-Черкесская Республика», общая протяженность автомобильных дорог республики, по состоянию на 01.01.2022 г., составляла 7065,7 км, из них федерального значения – 325,8 км, регионального значения – 1613,6 км, местного значения – 5126,3 км (https://yandex.ru/maps/geo/karachayevo_cherkesskaya_respublika).

Цель исследования – оценка степени опасности проявления оползневых процессов на автомобильных дорогах Карачаево-Черкесской Республики за 2005–2023 гг.

Одними из основных задач, решаемых в данной работе, являются:

- характеристика основных условий и причин активизации оползневых процессов на дорогах республики;
- анализ произошедших на дорогах республики наиболее значимых оползневых проявлений и оценка социально-экономических аспектов их последствий.

Материалы и методы исследований

Главным методом, используемым в данной работе, стал анализ различных источников, содержащих информацию об опасности проявления оползневых процессов на автомобильных дорогах Карачаево-Черкесской Республики. В качестве основных были использованы литературные источники [4, 5, 7, 14] и опубликованные данные Центра государственного мониторинга состояния недр (ГМСН) ФГБУ «Гидроспецгеология» [8–13]. В исследовании дополнительно были использованы следующие материалы (далее - Отчеты):

- отчет по объекту 60-4 «Ведение государственного мониторинга состояния недр территории Южного федерального округа в 2005–2007 гг.». Книга 1 (ЮРЦ ГМСН ФГУГП «Гидроспецгеология», Ессентуки, 2007);
- отчет о результатах работ по объекту 6-06/07 «Ведение государственного мониторинга состояния недр

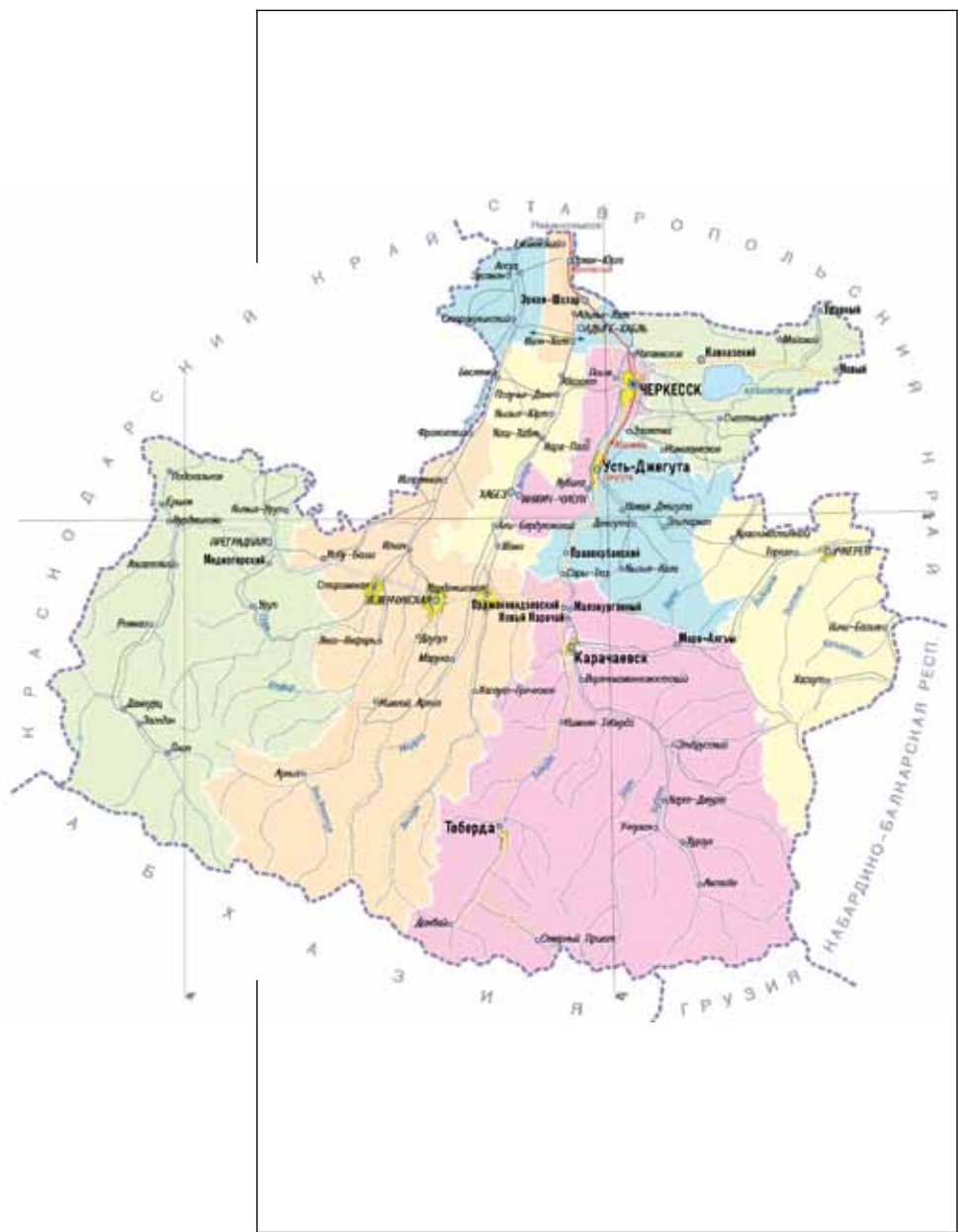


Рис. 1.

Административная карта Карачаево-Черкесской Республики с сетью автомобильных дорог.

Fig. 1. Administrative map of the Karachay-Cherkess Republic with the network of highways.

Источник: <https://mapsworld.ru/wp-content/uploads/2021/08/karachaevo-cherkessiya-s-gorodami-i-selami-na-karte.jpg>.

Source: <https://mapsworld.ru/wp-content/uploads/2021/08/karachaevo-cherkessiya-s-gorodami-i-selami-na-karte.jpg>.

- территории Южного федерального округа в 2008–2010 гг.». Книга 2 (ЮРЦ ГМСН ФГУГП «Гидроспецгеология», Ессентуки, 2011);
- геологический отчет по объекту «Государственный мониторинг состояния недр территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов в 2011–2013 гг.». Книга 2 (ЮРЦ ГМСН ФГБУ «Гидроспецгеология», Ессентуки, 2013);
- геологический отчет о результатах выполненных работ по объекту «Государственный мониторинг состояния недр территории Северо-Кавказского ФО в 2014–2015 гг.». Книга 1 (ЮРЦ ГМСН ФГБУ «Гидроспецгеология», Ессентуки, 2015).

Обобщение и систематизация собранного материала с единых методических позиций позволили достаточно достоверно оценить степень активности и опасности проявления оползневых процессов на автомобильных дорогах республики за изучаемый период времени. Для указания местоположения произошедших на автомобильной дороге оползневых проявлений использовались значения километрового знака (пикета), обозначающего (согласно ГОСТ 32869-2014) нумерованную точку разметки расстояния на дороге (отрезок дороги между смежными пикетными знаками равен 100 м).

Результаты исследований и их обсуждение

Согласно данным наблюдений [8–13] и проведенного нами ранее анализа [4, 5], на дорогах республики за 2005–2023 гг. было зафиксировано более 100 значимых оползневых проявлений (с материальным ущербом). Наибольшая степень оползневой активности на дорогах республики за исследуемый период отмечалась в 2016–2018 гг. Приведем результаты оценки активности и опасности проявления оползневых процессов на дорогах административных районов республики.

Значительной оползневой опасности подвержены автомобильные дороги в бассейне **р. Кубань** (окрестности г. Черкесска,

Абазинский, Карачаевский, Прикубанский и Усть-Джегутинский районы).

В окрестностях г. **Черкесск**, активизация (иногда объемом более 1,0 млн м³) оползневых процессов (в виде оползней скольжения и потоков) ранее неоднократно происходила на автодороге А-165 (на спуске в г. Черкесск). Так, например, значительные оползневые деформации и разрушения этого участка дороги были зафиксированы в 2008 и 2009 гг. В оползневые деформации вовлекались отложения четвертой надпойменной террасы р. Кубань. В 2020 г. на этом оползнеопасном отрезке автодороги специалистами ФКУ «Упрдор «Кавказ» была возведена железобетонная подпорная стена длиной 325 м с устройством 560 буронабивных свай. Для дополнительной устойчивости подпорную стену укрепили ростверками. Для пропуска воды под насыпью дороги переустроили 10 водопропускных труб, а для ее отведения с проезжей части создали прикромочные лотки.

Абазинский район расположен в центральной (среднегорной) части республики. Согласно статистическим данным [15], на 01.01.2023 г. общая протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием в районе составляла 202,2 км. Через район проходит региональная автомобильная дорога Лермонтов – Черкесск – Домбай.

В Абазинском районе оползневым процессам подвергаются в основном проезжие части улиц (внутрисельские дороги) северо-восточной окраины аула Псыж, где периодически наблюдается активизация крупного оползневого массива (протяженность – около 450 м, объем – до 1,0 млн м³) в левом борту р. Кубань. Еще в 2004 г. в результате оползневой активизации (после продолжительных ливневых дождей) в ауле были деформированы и частично разрушены проезжие части улиц Подгорная, Гагарина и Шанова. В 2006, 2008–2013 гг. на этом же массиве произошли значительные подвижки, которые опять привели к повреждению внутрисельских дорог. В период с июня по октябрь 2015 г. активизировались оползневые процессы в восточной части аула, вследствие чего здесь зафиксирована деформация проезжей части улицы. Активизация была вызвана раз-

мывом реки Кубань языковой части оползня, а также переувлажнением склоновых отложений атмосферными осадками и грунтовыми водами. В мае 2016 г. активизация на оползне продолжилась, в результате чего в нижней части склона произошло разрушение подпорной железобетонной стенки. В 2017 г. оползневыми массами было перекрыто 8 м проезжей части улицы. Осенью 2018 г. в восточной части аула оползневыми подвижками (площадь – 16,8 тыс. м², объем – 145 тыс. м³, мощность – до 10 м) уничтожено 20 м проезжей части по ул. Братьев Куджевых. В апреле 2019 г. на юго-восточной окраине аула (проезжая часть ул. Заречная и Братьев Куджевых) была зафиксирована небольшая активизация оползневого процесса (площадь – 37 м²). В 2020 г. на восточной окраине аула (ул. Куюмова) оползневыми массами (площадь – 10 м²) было перекрыто 3 м проезжей части улицы с захватом 1/3 ширины проезда. В 2021 г. здесь же было отмечено продолжение оползневой активности (площадь активной части – 10 м², мощность – 0,5 м), в результате чего грунтовыми массами было перекрыто 2 м проезжей части улицы с захватом 1/3 ширины проезда. В октябре 2023 г. в северо-восточной части аула (ул. Шанова) смещенными оползневыми массами (площадь – 35,75 тыс. м²) было деформировано 90 м автодороги без твердого покрытия.

Карачаевский район расположен в центральной и южной (горных) частях республики. Согласно статистическим данным [15], на 01.01.2023 г. общая протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием в районе составляла 759,6 км.

В Карачаевском районе активизация оползневых процессов наблюдалась как на межпоселковых, так и на внутрисельских дорогах (село Коста-Хетагурова, аулы Нижний Каенномост, Верхний Каенномост, Нижняя Теберда, Хумара, Верхняя Мара и Нижняя Мара). Так, в ауле Нижняя Теберда оползневая активность (в виде оползней скольжения объемом до 400 тыс. м³) может наблюдаться круглогодично на а/д Невинномысск – Домбай. Высокая оползневая активность также иногда фиксируется и на северной окраине аула Хумара (в правом борту долины р. Кубань) на участке автодо-

роги Карачаевск – Сары-Тюз (протяженностью 350 м). В весенне-летний период 2006 г. оползневые подвижки создали угрозу разрушения грунтовых дорог в селе (с.) Коста-Хетагурова, аулах Нижний Каменномост и Верхний Каменномост. Угроза разрушения внутри-сельских дорог существовала в этих населенных пунктах и в 2007 г. В 2008 г. в зоне влияния активного оползневого процесса находилась грунтовая автодорога в ауле Верхняя Мара. В 2009 г. в зоне воздействия активных оползневых деформаций, происходящих на территории аулов Верхняя и Нижняя Мара, находились автодороги федерального и местного значения. В 2010–2013 гг. активные оползневые проявления на территории аулов неоднократно приводили к деформации грунтовой автодороги. Высокая активность оползней в последние годы наблюдается и на межпоселковых дорогах Карачаевского района. Так, с мая по октябрь 2015 г. оползневые проявления фиксировались на автодороге Сары-Тюз – Каменномост. В 2016 г. на этом участке дороги было выявлено 10 оползневых участков шириной от 10 до 70 м. Их активизация привела к просадке и перекрытию оползневыми массами во многих местах дорожного полотна, а также развитию трещин и деформаций в низовом откосе дороги. Только за весенний период оползневыми массами было перекрыто 50 м этой дороги. Летом еще на трех участках этой дороги оползнями было деформировано и разрушено 140 м ее полотна. В этом же году оползневыми массами было перекрыто 50 м автодороги Сары-Тюз – Каменномост.

Весной 2017 г. оползневые активизации наблюдались в средне- и высокогорной зонах района на шести участках автодороги Кисловодск – Карачаевск (пикеты 49,95; 51,18; 51,63; 52,16; 53,64; 58,1 км). На первых пяти участках оползневые подвижки деформировали 305 м дороги, с просадкой грунтов от 2 до 5 см. А, на пикете 58,1 км оползневыми массами было перекрыто 20 м дороги. В низовом откосе, в пределах бровки дороги, отмечалось отседание дорожного полотна на 0,5 м, также было повреждено и ограждение дороги. На двух участках автодороги Новая Теберда – Домбай (пикеты 2,0 и 2,7 км) также произошла активизация оползневых процессов. На первом участке, в результате размыва языковой части оползня (площадь – до 550 м²) произошло оползание части до-

роги протяженностью 55 м. А на втором участке, оползневыми массами (площадь – 230 м²) было перекрыто 15 м дорожного полотна.

Летом 2018 г. активизация оползней скольжения в низовых откосах а/д Кисловодск – Карачаевск привела к образованию трещин закола с шириной раскрытия до 10 см, проседанию обочины дороги (до 25 см) и отседанию бетонных отбойников (горизонтальное смещение – до 30 см) на семи участках (пикеты 44,0; 47,0; 56,0; 58,0; 59,0; 60,0 и 81,0 км) общей протяженностью 190 м. В этом же году, в бассейне р. Кубань наблюдалась незначительная оползневая активность на двух оползневых участках верхового откоса а/д Карачаевск – Учкулан (пикеты 28,6 и 43,6 км) протяженностью 30 и 50 м. На первом участке зафиксирована активизация оползня скольжения (площадь – 25 м², мощность оползневых отложений – до 0,5 м) на юго-восточном фланге. Отложения представлены делювиальными суглинками и гравийно-галечными отложениями с супесчаным и суглинистым заполнителем. На втором участке активизация произошла в результате выемки грунта на участке протяженностью 50 м. Развитие процесса выражено вывалами склоновых отложений к подножию склона верхового откоса. Отложения представлены делювиальными суглинками с включением окатанных валунов.

В апреле 2019 г. была зафиксирована оползневая активизация (площадь – 84 м², мощность – 0,7 м) в верховом откосе а/д Кисловодск – Карачаевск (пикет 44,0 км), обочина которой явилась базисом развития процесса. В июне этого же года после сильных дождей на автодорогу (в районе аула Нижняя Мара) сошли оползневые массы, которые ее смыли. В 2020 г. активизация оползневого процесса (без материального ущерба) на этой автодороге повторилась, но уже на двух участках в верховом откосе дороги. В оползневые смещения были вовлечены современные делювиальные суглинки с обильным включением щебня и обломков песчаников. В 2021 г. в низовом откосе а/д Кисловодск – Карачаевск (пикет 94,44 км) было выявлено активное проявление оползневого процесса (площадь – 340 м²). В головной части оползня отмечалось образование трещин закола с шириной раскрытия до 6 см. В оползневые смещения вовлечены делювиальные суглинки голоцена, содержащие обильные включения обломков песчаников. В результате активизации было деформиро-

вано 10 м обочины дороги, наблюдалось отседание вниз по склону бетонных блоков ограждения.

Прикубанский район расположен в северо-восточной части республики. Согласно статистическим данным [15], на 01.01.2023 г. общая протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием в районе составляла 518,1 км.

В Прикубанском районе активная оползневая деятельность (вызванная выпадением атмосферных осадков, боковой эрозией рек и техногенным воздействием) отмечалась в основном на внутри-сельских дорогах (проезжих частях улиц) в населенных пунктах (села Пригородное, Чапаевское, Николаевское, Счастливое, Светлое, Пристань, п. Мичуринский). Следует отметить, что в с. Чапаевском и п. Мичуринском оползневая активизация в основном происходила в течение всего года, а в остальных населенных пунктах – с марта по июнь. Периодически активизирующиеся оползни (преимущественно в виде оползней скольжения, переходящих в потоки) объемом от 250 тыс. до 1–2 млн м³ наблюдались в селах Счастливое, Светлое, Пристань, Чапаевское, где разрушительному воздействию подвергались грунтовые дороги. Значимая оползневая активизация здесь фиксировалась в 2006, 2008–2010, 2014 гг. В с. Николаевском катастрофические подвижки грунтовых масс (после ливневых дождей) были зафиксированы в мае-августе 2014 г. на оползневом массиве (площадь – 200,0 тыс. м², объем – около 1 млн м³, мощность – 5 м) в южной части села (левый борт долины р. Абазинка). Здесь в течение двух суток отдельные блоки сместились на 50 м вниз. В центральной части оползневого склона грунтовые массы (ширина – 100 м, длина – 200 м, мощность – до 5 м) подошли вплотную к а/д Николаевское – Койдан.

На федеральной а/д Пятигорск – Черкесск (пикеты 79,0–81,0 км) наиболее благоприятные для оползнеобразования условия сложились в 2005 и 2006 гг., когда были зафиксированы катастрофические деформации 600 м дороги со смещением буронабивных свай. Оползневые деформации происходили при значительных суммах осадков и техногенном воздействии (подрезка склона, вибрация от автотранспорта).

Усть-Джегутинский район расположен в северо-западной части Карачаево-Черкесии. Согласно статистическим данным [15], на 01.01.2023 г. общая протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием в районе составляла 603,9 км.

В Усть-Джегутинском районе оползневым процессам в разное время подвергались дороги (проезжие части улиц) в г. Усть-Джегута, станице (ст.) Красногорской, ауле Эльтаркач. На территории ст. Красногорской наиболее подвержены оползневым процессам улицы Подгорная и Тракторная. В зоне влияния оползней здесь находится а/д Невинномысск – Домбай, на которой периодически отмечаются деформации и разрушения ее полотна. Оползневой процесс в окрестностях станицы активно развивался в 2004, 2008, 2010, 2012 и 2013 гг. В окрестностях аула Эльтаркач активизация оползневых процессов (в виде оползней скольжения и потоков) наблюдается довольно давно. Так, в 2005–2007 гг. оползневые подвижки создали угрозу разрушения внутрисельской дороги. В 2010–2015 гг. на дорогах аула также отмечалась повышенная оползневая активность.

В мае 2014 г. в западной части г. Усть-Джегута (на уступе III правобережной надпойменной террасы р. Кубань), в результате выпадения обильных атмосферных осадков, активизировался оползневой массив (площадь – 50,0 тыс. м², объем - 150 тыс. м³, мощность – 3 м), вследствие чего произошло проседание грунта с образованием трещин отрыва. В зоне оползневого влияния находилась грунтовая дорога. В смещение были вовлечены насыпной грунт (почва, строительный мусор), суглинки и гравийно-галечниковые отложения, слагающие верхнюю часть геологического разреза террасы. Летом этого же года произошла активизация оползня по ул. Кубанской, в зоне деформаций находилась грунтовая дорога.

Высокая степень активности оползневых процессов наблюдается и на межпоселковых дорогах Усть-Джегутинского района (автодороги Черкесск – Домбай и Кисловодск – Усть-Джегута). На а/д Черкесск – Домбай наиболее значимые подвижки (в виде оползней скольжения объемом до 10 млн м³) происходят между с. Важное и ст. Красногорской. Ситуация здесь усугубляется активным развитием эрозионных процессов в правом берегу р. Кубань, в результате

чего происходит размыв языковой части оползня, что заметно усиливает его активность. В 2005 г. значительные суммы осадков и техногенное воздействие (подрезка склона, вибрация от автотранспорта) определили здесь высокую активизацию оползневых процессов, в результате чего произошла деформация отдельных участков дороги. Скорость смещения дорожного полотна составила по горизонтали 2–4 м/год, а по вертикали – 0,2–0,9 м/год. В 2006 и 2007 гг. оползневая деформация отдельных участков дороги продолжилась, затронув новые ее отрезки. В 2010–2014 гг. оползневые подвижки опять деформировали дорожное полотно, существовала угроза безопасности движения автотранспорта. Причиной оползневой активизации стали интенсивные дождевые осадки, техногенное воздействие, нарушение гидродинамического режима грунтовых и подземных вод. В апреле 2019 г. на двух участках автодороги (в правом борту р. Кубань) были зафиксированы небольшие активные оползни скольжения, образовавшие стенки срыва (до 2 м) и трещины закола (протяженность – 90 м, ширина раскрытия – 3–10 см, глубина – до 0,5 м) на бровке верхового откоса. В 2020 г. на автодороге (северо-восточнее ст. Красногорская) было выявлено четыре активных проявления оползневого процесса, приуроченных к ее верховому откосу. На трех участках угроза воздействия на полотно автодороги отсутствовала. В зоне потенциального воздействия четвертого оползневого проявления, в виде трещины закола (ширина раскрытия трещины – до 0,4 м, протяженность – 140 м, видимая глубина – до 0,5 м, площадь – 6,2 тыс. м²) в головной части оползня, находилась дорога. В 2021 г., в этом же месте опять была зафиксирована оползневая активизация (в виде трещин растяжения протяженностью до 200 м, с шириной раскрытия от 3 см до 0,4 м и видимой глубиной до 0,5 м), расположенная в 25–40 м от бровки крутого террасированного верхового откоса дороги. Протяженность трещин растяжения, относительно 2020 г., увеличилась на 60 м, площадь активной части составила около 6770 м². В потенциальной зоне оползневого воздействия находился участок дороги.

На федеральной а/д Кисловодск – Усть-Джегута также отмечается довольно значительная степень оползневой активности. В 2005–2007 гг. на участке дороги (от восточной границы района до

аула Новая Джегута) наблюдалась оползневая деформация отдельных участков ее полотна. Так, 24 мая 2006 г., в 0,6 км северо-восточнее аула Эльтаркач, в результате активизации древнего оползня (площадь – 8,0 тыс. м², объем – 60 тыс. м³), подрезанного тремя витками этой дороги, было перекрыто грунтовыми массами ее полотно. В 2008 г. оползневые проявления отмечались уже на четырех участках дороги (протяженностью от 200 до 400 м), что также привело к перекрытию дорожного полотна. В этом же году в 0,6 км северо-восточнее аула Эльтаркач был зафиксирован сход оползня потока (площадь – 8,0 тыс. м², объем – около 60 тыс. м³) через а/д Кисловодск – Усть-Джегута, временно парализовавший движение автотранспорта. Высота стенок срыва оползня достигала 6 м. Причиной активизации, помимо интенсивных дождевых осадков, явилась подрезка древнего оползневого тела тремя витками дороги, в связи с чем была нарушена устойчивость контрфорса оползня. В 2010–2013 и 2015 гг. повышенная оползневая активность на автодороге и деформация отдельных ее участков сохранялась. В 2017 г. произошла оползневая активизация в низовом откосе автодороги, в результате в оползневые смещения была вовлечена бровка ее низового откоса с бетонными отбойниками на интервале 85 м (рис. 2). Высота стенки срыва достигала 1,5 м.

В 2018 г. на отдельных участках автодороги (пикеты 47,6 и 51,5 км) отмечалась активизация оползней скольжения на склонах низового откоса, в результате чего образовались трещины закола на обочинах дороги общей протяженностью 70 м, с шириной раскрытия до 5 см и отседанием обочины на 0,3 м.

Значительная оползневая активность наблюдается на автодорогах в долинах рек Малый и Большой Зеленчук (Адыге-Хабльский, Зеленчукский, Ногайский и Хабезский районы).

Адыге-Хабльский район расположен в северо-западной части республики. Согласно статистическим данным [15], на 01.01.2023 г. общая протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием в районе составляла 223,1 км.

В Адыге-Хабльском районе наиболее подвержены оползневым процессам внутрисельские дороги в с. Спарта и аулах Вако-



Рис. 2.

Участок активизации оползневого процесса в низовом откосе автодороги Кисловодск – Усть-Джегута, Усть-Джегутинский район, 2017 г.

Fig. 2. The area of activation of the landslide process in the lower slope of the highway Kislovodsk - Ust-Dzheguta, Ust-Dzhegutinsky district, 2017.

Источник:
Source:

Фото «ЮРЦ ГМЧН».
Photo by YURTS GMSN.

Жиле, Адыге-Хабль, Эрсакон. Так, в 2008 г., активизация длительно активного оползневого участка в ауле Эрсакон привела к деформации внутрисельской дороги. В этом же году разрушительному воздействию оползневых процессов (оползни блоки, переходящие в потоки, объемом до нескольких миллионов кубических метров) подверглись дороги в ауле Спарта. В 2009 и 2010 гг. катастрофическая оползневая активизация в этом ауле повторилась. В 2010 г. оползневые подвижки привели к деформации грунтовой дороги в ауле Эрсакон, а в 2014 г. в зоне влияния оползневых процессов уже находилась практически вся восточная окраина аула протяженностью около трех километров, в том числе и грунтовая автодорога. Активизация была вызвана атмосферными осадками, техногенными воздействиями и нарушением гидродинамического режима грунтовых и подземных вод. Активизация оползневого процесса (8 ноября 2015 г.) на южной окраине с. Спарта привела к перекрытию грунтовыми массами (площадь – 20,0 тыс. м², объем – 6750 м³, мощность – 2,5 м) 60 м полотна а/д Спарта – Кызыл-Тогай (рис. 3).

В 2017 г. активизация оползневого процесса в с. Спарта была выявлена по ул. Каюмова, в результате чего 8 м проезжей части было перекрыто грунтовыми массами.

Довольно значительные оползневые активизации происходят и на межпоселковых дорогах Адыге-Хабльского района. Наиболее подвержены оползневому процессам автодороги Спарта–Кызыл-Тогай и Эркен-Юрт–Эрсакон. Так, 3 июля 2015 г. на участке а/д Спарта – Кызыл-Тогай (между с. Спарта и а. Баралки) было завалено оползневыми массами 150 м дорожного полотна. В 2016 г. на этой же дороге (пикет 7,8 км), в 50–70 м выше ее полотна, были отмечены свежие трещины закола шириной до 0,5 м. На а/д Эркен-Юрт – Эрсакон оползневые проявления наблюдались в 2010, 2014 и 2016 гг. В 2016 г., на двух участках дороги оползневыми подвижками (площадью от 470 до 1700 м²) было деформировано 215 м ее полотна.

Ногайский район расположен в северной (равнинной) части Карачаево-Черкесской республики. Согласно статистическим данным [15], на 01.01.2023 г. общая протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием в районе составляла 282,9 км.



Рис. 3.

Перекрытие оползневыми массами автодороги Спарта – Кызыл-Тогай, Адыге-Хабльский район, 2015 г.

Fig. 3. Blocking of the Sparta – Kyzyl-Togai highway by landslide masses, Adyge-Khablsky district, 2015.

Источник:

ОАО «Гидрогеоэкология».

Source:

Photo by JSC Hydrogeoecology.

На внутрисельских дорогах Ногайского района проявление оползневых процессов зафиксировано в аулах Эркен-Юрт и Адиль-Халк. В ауле Эркен-Юрт значимые оползневые подвижки на проезжих частях улиц наблюдались в 2005, 2008–2014 гг. Так, в 2005 г. значительные суммы осадков и техногенное воздействие определили повышенную активизацию оползней в ауле Эркен-Юрт, в результате чего было деформировано 140 м грунтовых дорог. В 2008–2010 гг. разрушительному воздействию оползневых процессов (оползни блоки, переходящие в потоки, объемом до нескольких миллионов кубических метров) подвергались дороги в ауле Эркен-Юрт. В окрестностях аула Адиль-Халк активизация оползневого процесса также фиксировалась неоднократно. Значительная активность из-за сильных ливней наблюдалась в ауле 1 июня 2012 г., когда сползшие оползневые массы (площадь – 7,5 м²) повредили часть грунтовой дороги.

Межпоселковые дороги района также подвержены оползневому воздействию. Так, 26 мая 2006 г. оползновыми подвижками было разрушено 70 м а/д Черкесск – Кисловодск (пикет 21,0 км), в результате чего было приостановлено движение транспорта. В зоне влияния оползневых процессов находится и участок а/д Кызыл-Тогай – Икон-Халк (где дорога серпантином спускается к аулу Кызыл-Тогай).

Зеленчукский район расположен в юго-западной части республики. Согласно статистическим данным [15], на 01.01.2023 г. общая протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием в районе составляла 555,6 км.

В Зеленчукском районе наибольшее развитие оползневые процессы получили на уступах II и III надпойменных террас рек Большой и Малый Зеленчук. Значительная активизация оползневых процессов наблюдалась на внутрисельских дорогах в ауле Кызыл-Октябрь и ст. Исправная. Так, 5 сентября 2007 г. в ауле Кызыл-Октябрь была зафиксирована активизация оползня потока объемом около 260 м³ и протяженностью около 120 м. В потенциально опасной зоне находилась проезжая часть ул. Халилова. В мае 2019 г., в результате оползневой активизации (длина – 45 м, ширина – 21 м, мощность – 1 м) на северо-западной окраине ст. Исправной было разрушено 85 м грунтовой дороги.

Довольно активно оползневые процессы проявляются и на межпоселковых дорогах района (Сторожевая – Исправная, Сторожевая – Преградная, Зеленчукская – Архыз). Так, в 2009 г. оползневые подвижки привели к деформации полотна а/д Сторожевая – Исправная (в правом борту долины р. Большой Зеленчук). А 27 мая 2010 г. в 500 м южнее ст. Исправной (также в правом борту долины р. Большой Зеленчук), оползнем обвалом (объем – 1,0–1,5 тыс. м³) было перекрыто 70 м дорожного полотна. На стенке срыва в нижней части оползня наблюдался выход трещинных вод. На данном участке в дальнейшем возможно обвально-оползневое обрушение 100 м дороги за счет размыва основания оползня рекой, так как почти все русло р. Большой Зеленчук примыкает к правому берегу. В 2016 г. на автодороге (пикет 18 км) отмечались деформации (площадь – 900 м²) ее полотна на 2/3 ее ширины, на участке длиной 100 м. В 2018 г. на правом крутом борту р. Большой Зеленчук, на двух участках дороги (пикеты 17,0 и 17,5 км) зафиксирована активизация оползневого процесса. На первом участке протяженностью 50 м результатом выемки грунта для строительных нужд явилось незначительное оползание головной части верхового откоса автодороги. На втором участке оползневая активизация была вызвана подмывом склона. Развитие процесса было выражено в виде образования трещин закола протяженностью 50 м (с шириной раскрытия до 0,5 см) на обочине низового откоса автодороги, а также слабого проседания полотна автодороги.

В марте 2016 г. на двух участках а/д Сторожевая – Преградная (пикеты 10,0 и 14,6 км) произошла активизация оползневых процессов. На первом участке отмечалась деформация 70 м полотна дороги и просадка грунтов (около 10 см), а на втором участке было деформировано 15 м дорожного полотна. В 2017 г. оползневые подвижки на этих двух участках привели к деформации 85 м полотна дороги. В 2018 г., оползневые активизации в виде оползней скольжения опять наблюдались на двух участках этой дороги (пикеты 14,3 и 16,4 км). Оползневые отложения были представлены делювиальными суглинками со щебнем и обломками мергелей и песчаников (с отсыпкой по обочине гравийно-галечным материалом). На первом участке активизация наблюдалась как на склоне низового откоса дороги высотой до 15 м, крутизной до 50°, так и в верхо-

вом откосе дороги протяженностью 30 м. Ширина оползня варьировала от 4 м (в головной части) до 10 м (в основании склона), длина составляла 15 м, мощность оползневых отложений достигала 0,5 м. Вдоль обочины низового откоса наблюдались трещины закола с шириной раскрытия 0,5–0,7 см. Отмечена деформация 10 м дороги с вертикальным смещением. На втором участке оползневая активизация не привела к деформации дороги. В 2019 г. на автодороге (пикет 14,3 км) опять, как и в предыдущем году, зафиксирована активизация оползневого процесса на склоне низового откоса дороги высотой до 15 м и в верховом откосе дороги протяженностью 20 м, с захватом до 1,5 м дорожного полотна. В 2020 г. активизация оползневого процесса (площадь активной части – 50 м²) на этом участке дороги повторилась. Оползнем было деформировано 10 м дорожного полотна с захватом около 1 м обочины низового откоса. В 2022 г. на этом же участке дороги продолжилась активизация оползневого процесса (площадь активной части – 35 м²), охватившего низовой откос и обочину дороги на интервале 10 м (с захватом полотна дороги шириной до 0,5 м). В марте 2023 г. активизация оползневого процесса (площадь – 270 м², объем – 135 м³) привела к частичной деформации автодороги на этом же участке.

На а/д Зеленчукская – Архыз (пикет 39,2 км) в 2018 г. было зафиксировано незначительное оползание (в виде оползня скольжения) в верховом откосе. Мощность оползневых отложений, представленных делювиальными суглинками с обильным включением обломков и глыб скальных пород, достигала 0,5 м. Фактором активизации явилась выемка грунта для строительных нужд на участке протяженностью 100 м.

Хабезский район расположен в западной части республики. Согласно статистическим данным [15], на 01.01.2023 г. общая протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием в районе составляла 532,4 км.

В Хабезском районе оползневая деятельность проявляется на внутрисельских улицах в аулах Хабез и Жако. Так, на восточной окраине аула Хабез в июле 2008 г. был зафиксирован сход оползня скольжения (горизонтальная амплитуда смещений отдельных блоков оползших грунтов на склоне составляла 8 м, вертикальная – до 5 м).

В зоне влияния оползня находилась грунтовая автодорога. Причинами оползневой активизации в 2008 г. в ауле Жако (правый борт долины р. Малый Зеленчук) явились интенсивные дождевые осадки, нарушение гидродинамического режима грунтовых и подземных вод. В августе 2009 г. в северо-восточной части аула наблюдались значимые оползневые подвижки на оползневом массиве (объем – около 450 тыс. м³, длина – 400 м, ширина – 225 м, мощность оползневого тела – 5 м). В течение двух суток массив сместился на 20 м, затем скорость его движения замедлилась и тело оползня постепенно надвинулось на нижележащую территорию. Нагрузка на грунты от давления наползшей массы вызвала деформации полотна дороги по ул. Северная. В 2010 и 2014 гг. оползневая активизация здесь повторилась, но уже с гораздо меньшей активностью. В 2018 г. на восточной окраине аула на трех участках (площадью 450, 2250 и 2900 м²) была зафиксирована небольшая активизация оползневых процессов с появлением новых сколов и трещин растяжения на проезжей части улицы.

Урупский район (долина р. Уруп) расположен в юго-западной горной части республики. Согласно данным Паспорта муниципальной программы «Комплексное развитие транспортной инфраструктуры на территории Урупского муниципального района на 2016–2025 годы» от 14.04.2016 г., протяженность автомобильных дорог общего пользования в границах Урупского района на 01.01.2016 г. составляла 316,1 км.

В Урупском районе значимая оползневая активность наблюдалась в северо-восточной части аула Кызыл-Уруп 30 июня 2015 г., когда после выпадения обильных ливневых дождей активизировался крупный оползневой массив (объем – около 1,3 млн м³, длина – около 1300 м, ширина – 250 м, мощность – 4 м). Скорость его движения составляла от 6 до 16 м/сут. В теле оползня отмечались многочисленные поперечные трещины закола, а в языковой части – валы выпирания высотой до 6 м. Наблюдалась разгрузка поверхностного стока и грунтовых вод в тело оползня с образованием промоин. В опасной зоне возможного воздействия оползневых смещений находилась грунтовая автодорога. В 2016 г. подвижки этого оползня повторились. В последние годы наблюдается стабилизация на теле оползня.

Таблица. ПРОТЯЖЕННОСТЬ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ В КАРАЧАЕВО-ЧЕРКЕССКОЙ РЕСПУБЛИКЕ, ИСПЫТАВШИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ ЗА ПЕРИОД 2010–2023 ГГ.
Table. The length of public roads in the Karachay-Cherkess Republic affected by landslide processes in the period 2010–2023

Годы	Всего	В том числе	
		дороги с твердым покрытием	дороги без покрытия
2010	0,640	0,280	0,360
2011	0,640	0,280	0,360
2012	0,700	0,280	0,420
2013	0,740	0,290	0,450
2014	0,930	0,200	0,730
2015	0,780	0,520	0,260
2016	0,940	0,890	0,050
2017	0,930	0,930	—
2018	0,310	0,290	0,020
2019	0,110	0,020	0,090
2020	0,015	0,012	0,003
2021	0,017	0,015	0,002
2022	0,014	0,010	0,004
2023	0,050	0,040	0,010
Итого за 14 лет:	6,816	4,057	2,759

Малокарачаевский район расположен на востоке республики. Согласно статистическим данным [15], на 01.01.2023 г. общая протяженность автомобильных дорог с твердым покрытием в районе составляла 599,7 км.

В Малокарачаевском районе оползневые деформации отмечаются на проезжих частях улиц в селах Красный Восток, Красный Курган, Элькуш и ауле Кызыл-Покун. Так, в 2007 г. в северо-восточной части с. Красный Восток (на уступе правобережной террасы р. Кума протяженностью 900 м) произошла активизация оползне-

вого процесса, в зоне влияния которого находилась грунтовая автодорога. В 2008 г. воздействию оползней подвергались внутрисельские дороги в ауле Кызыл-Покун и селах Красный Курган и Элькуш. В 2011 г. активные оползневые проявления в этих населенных пунктах привели к деформации грунтовой автодороги.

Оползневые проявления (в виде оползней скольжения и потоков) иногда наблюдаются на а/д Кисловодск – Усть-Джегута (в пределах Малокарачаевского района). Так, в 2013 г. произошла активизация оползневого процесса на одном из участков этой дороги (от с. Красный Восток до границы с Усть-Джегутинским районом). В 2017 г. в результате оползневой активизации (площадь – до 865 м²) на участке дороги между с. Красный Восток и аулом Эльтаркач (пикет 6,4 км), в оползневые смещения была вовлечена бровка низового откоса с бетонными отбойниками на участке длиной 85 м.

Подводя итог вышеописанному, отметим, что только за период 2010–2023 гг. на территории республики оползневыми процессами было деформировано и разрушено 6,816 км дорог, в том числе: 4,057 км дорог с твердым покрытием и 2,759 км дорог без покрытия. Наибольший ущерб автомобильным дорогам республики эти процессы причинили в 2016 и 2017 гг. (табл.).

Заключение

Проведенные систематизация и анализ различных источников, содержащих информацию об активизации оползневых процессов в Карачаево-Черкесской Республике, позволили охарактеризовать условия и причины, а также оценить опасность оползневой деятельности на автомобильных дорогах республики за 2005–2023 гг. Определена роль природного и техногенного факторов в развитии данного процесса. Максимальное число случаев оползневой активизации на дорогах республики приурочено к весенне-летнему периоду и в основном обусловлено обильными атмосферными осадками. За изучаемые 19 лет зафиксировано более 100 значимых оползневых проявлений, причинивших ущерб автомобильным дорогам, проходящим по 10 административным районам республики. Только за период 2010–2023 гг. оползневыми процессами было деформировано (повреждено, разрушено) 6,816 км дорог, из них: 4,057 км дорог с твердым покрытием и 2,759 км

дорог без покрытия. Большинство участков дорог, где произошли оползневые активизации за изучаемый период времени, расположены в Карачаевском и Усть-Джегутинском районах республики. Относительно высокий уровень оползневой активности на дорогах республики отмечался в 2016–2018 гг. Объем наиболее катастрофических оползневых подвижек вблизи автодорог иногда достигал 1–2 млн м³. Выявлены участки дорог, где оползневые активизации периодически наблюдались в разные годы. Приведены сведения о местоположении оползневых проявлений, активности и масштабах произошедших оползневых деформаций и разрушений полотна дорог в разных районах республики. Анализ социально-экономических последствий произошедших оползневых активизаций позволяет сделать вывод о довольно значительной степени опасности оползневой деятельности на автомобильных дорогах Карачаево-Черкесской Республики.

Список источников

1. Абайханова А. А., Шкарлет К. Ю., Харин К. В. Современное состояние долинных ландшафтов Карачаево-Черкесской Республики // Естественные и технические науки. 2011. № 6 (56). С. 314–317.
2. Кипкеева П. А., Потапенко Ю. Я., Курумбаев И. Р. Результаты геоэкологического обследования долины р. Теберда // Ландшафтно-рекреационный потенциал Карачаево-Черкесии. Материалы XII научно-практической конференции. Карачаевск: КЧГУ, 2015. С. 25–28.
3. Крохмаль А. Г. Карачаево-Черкесия: Эколого-географические проблемы. Ростов-на-Дону: Издательство Ростовского госуниверситета, 1999. 200 с.
4. Разумов В. В., Богданова Н. Д., Аджиев А. Х., Кондратьева Н. В., Разумова Н. В. База данных оползневых активизаций, произошедших на территории Карачаево-Черкесской Республики в 2005-2020 гг. // Заявка № 2022623550 от 06.12.2022 г. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022623521 от 19.12.2022 г.
5. Разумов В. В., Богданова Н. Д., Висхаджиева К. С., Разумова Н. В. Масштабы распространения и активность проявления оползневых процессов в Карачаево-Черкесской Республике // Геориск. 2020. Т. XIV. № 2. С. 78–87.

6. Разумов В. В., Федченко Л. М., Разумова Н. В., Богданова Н. Д., Шальнев В. А. Масштабы распространения и активность проявления обвально-осыпных процессов в Карачаево-Черкесской Республике // Наука. Инновации. Технологии. 2023. № 3. С. 97–111.
7. Схема территориального планирования Карачаево-Черкесской Республики. Том II. Современное состояние. Книга 1. Ростов-на-Дону: Южный градостроительный центр, 2008. 187 с.
8. Информационные бюллетени о состоянии недр на территории Российской Федерации в 2004–2022 гг. М.: Изд-во «Геоинформмарк», 2005–2023. Вып. 28–46.
9. Информационные бюллетени о состоянии недр территории Северо-Кавказского федерального округа Российской Федерации за 2015–2023 гг. Ессентуки: Изд-во «Гидроспецгеология», 2016–2024. Вып. 12–20.
10. Информационные сводки о проявлениях экзогенных геологических процессов на территории Российской Федерации (по кварталам) за 2007–2023 гг. М.: Изд-во «Гидроспецгеология», 2007–2023.
11. Информационные сводки о проявлениях экзогенных геологических процессов на территории Южного федерального округа (по кварталам) за 2005–2010 гг. Ессентуки: Изд-во «Гидроспецгеология», 2005–2010.
12. Информационные сводки о проявлениях экзогенных геологических процессов на территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов (по кварталам) за 2011–2012 гг. Ессентуки: Изд-во ЮРЦ ГМСН ФГБУ «Гидроспецгеология», 2011–2012.
13. Информационные сводки о проявлениях экзогенных геологических процессов на территории Северо-Кавказского федерального округа (по кварталам) за 2013–2023 гг. Ессентуки: Изд-во ЮРЦ ГМСН ФГБУ «Гидроспецгеология», 2013–2023.
14. Доклады «О состоянии защиты населения и территорий Карачаево-Черкесской Республики от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера за 2004-2018 годы». Черкесск: Главное управление МЧС России по Карачаево-Черкесской Республике, 2005–2019.
15. Карачаево-Черкесская Республика. Статистический сборник. ОП Северо-Кавказстата по КЧР. Черкесск, 2023. 253 с.

References

1. Abaykhanova AA, Shkarlet KYu, Kharin KV. Current state valley of landscapes of Karachaevo-Circassian Republic. Natural and technical sciences. 2011;(6(56)):314-317. (In Russ.).
2. Kipkeeva PA, Potapenko YuYa, Kurumbaev IR. Results of geoeological survey of the Teberda river valley. Landscape and recreational potential of Karachay-Cherkessia. In Proceedings of the XII scientific and practical conference. Karachayevsk: KChSU; 2015;25-28. (In Russ.).
3. Krokhmal AG. Karachay-Cherkessia: Ecological and geographical problems. Rostov-on-Don: Publishing House of Rostov State University; 1999. 200 p. (In Russ.).
4. Razumov VV, Bogdanova ND, Adzhiev AKh, Kondratieva NV, Razumova NV. Database of landslide activations that occurred in the territory of the Karachay-Cherkess Republic in 2005-2020. Application No. 2022623550 dated 06.12.2022. Certificate of state registration of the database No. 2022623521 dated 19.12.2022. (In Russ.).
5. Razumov VV, Bogdanova ND, Viskhadzhieva KS, Razumova NV. The scale of distribution and activity of manifestation of landslide processes in the Karachay-Cherkess Republic. Georisk. 2020;XIV(2):78-87. (In Russ.).
6. Razumov VV, Fedchenko LM, Razumova NV, Bogdanova ND, Shalnev VA. The scale of distribution and activity of manifestation of landslide-talus processes in the Karachay-Cherkess Republic. Science. Innovations. Technologies. 2023;(3):97-111. (In Russ.).
7. Territorial planning scheme of the Karachay-Cherkess Republic. Volume II. Current state. Book 1. Rostov-on-Don: NPO "Southern Urban Development Center"; 2008. 187 p. (In Russ.).
8. Information bulletins on the state of subsoil resources in the territory of the Russian Federation in 2004-2022. Moscow: Publishing house of «Geoinformmark»; 2005-2023. Issue 28-46. (In Russ.).
9. Information bulletins on the state of subsoil resources in the territory of the North Caucasian Federal District of the Russian Federation for 2015-2023. Essentuki: Publishing house of the Southern Regional Center of the Federal State Budgetary Institution "Gidrospetsgeologiya"; 2016-2024. Issue 12-20. (In Russ.).

10. Information reports on the manifestations of exogenous geological processes in the territory of the Russian Federation (by quarters) for 2007-2023. Moscow: Publishing house of the Center for State Marine and Marine Science of the Federal State Budgetary Institution "Gidropetsgeologiya"; 2007-2023. (In Russ.).
11. Information reports on the manifestations of exogenous geological processes in the territory of the Southern Federal District (by quarters) for 2005-2010. Essentuki: Publishing house of the Southern Regional Center for State Marine and Marine Science of the Federal State Budgetary Institution "Gidropetsgeologiya"; 2005-2010. (In Russ.).
12. Information reports on the manifestations of exogenous geological processes in the territory of the Southern and North Caucasian Federal Districts (by quarters) for 2011–2012. Essentuki: Publishing house of the Southern Regional Center for State Marine and Marine Science of the Federal State Budgetary Institution "Gidropetsgeologiya"; 2011-2012. (In Russ.).
13. Information reports on the manifestations of exogenous geological processes in the territory of the North Caucasian Federal District (by quarters) for 2013–2023. Essentuki: Publishing house of the Southern Regional Center of the State Scientific-Mechanical Society of the Federal State Budgetary Institution "Gidropetsgeologiya"; 2013-2023. (In Russ.).
14. Reports "On the state of protection of the population and territories of the Karachay-Cherkess Republic from emergency situations of natural and man-made nature for 2004-2018». Cherkessk: Main Directorate of the Ministry of Emergency Situations of Russia for the Karachay-Cherkess Republic; 2005-2019.
15. Karachay-Cherkess Republic. Statistical digest. OP North Caucasus Statistics for the KCR. Cherkess, 2023. 253 p. (In Russ.).

Информация об авторах

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

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

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

Вклад авторов

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

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

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

Information about the authors

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

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

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

Contribution of the authors

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

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

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



Научная статья

УДК 336.76

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.2>

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ПОЧВ СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕУВЛАЖНЕНИЯ

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.

Объектом исследования стали гидроморфные почвы Ташлянского ландшафта байрачных лесостепей, выделенного в Ставропольском крае. Изучена радиальная геохимическая структура дифференциации валовых содержаний Zn, Cu, Pb и Cd в профиле лугово-черноземных почв, формируемых под воздействием постоянного грунтового и сезонного поверхностного увлажнения. Также исследованы особенности латеральной геохимической дифференциации микроэлементов в лугово-черноземных почвах по отношению к общей латеральной структуре миграции химических элементов, характерной для ландшафтно-геохимической мезокатены, заложенной в пределах Ташлянского ландшафта. Основными методами стали: полевой, камерально-аналитический, анализ научной информации по исследованию аналогичных ландшафтно-геохимических процессов. Установлены морфологические характеристики и ряд физико-химических свойств лугово-черноземных почв, которые свидетельствуют о формировании в профиле почв дифференциации по щелочно-кислотным условиям (идет смена нейтральной реакции среды в гумусовом горизонте на слабощелочную в нижней части почвенного профиля) и окислительно-восстановительным обстановкам (происходит смена окислительной среды на восстановительную глеевую среду). Радиальная структура дифференциации валовых содержаний Zn и Cu соответствует поверхностно-аккумулятивному распределению, что, вместе с установленными статистически значимыми коэффициентами корреляции с содержанием гумуса, свидетельствует о закреплении Zn и Cu на биогеохимическом барьере в составе органоминеральных соединений. Для радиальной структуры дифференциации Pb и Cd свойственно элювиально-иллювиальное распределение. Установленные коэффициенты корреляции

косвенно подтверждают закрепление Pb и Cd в составе алюмосиликатных глинистых минералов. Важными фазами-носителями микроэлементов в гидроморфных почвах являются оксиды (гидроксиды) Fe и Mn, карбонаты, легкорастворимые соли, которые визуальнo определены в их профиле. В общей картине латеральной дифференциации микроэлементов по ландшафтно-геохимической мезокатене лугово-черноземные почвы выступают как малоконтрастные концентраторы Zn и Cu. Более интенсивная радиальная миграция Pb и Cd из гумусовых горизонтов в гидроморфных условиях сказывается на особенностях их латерального распределения по ландшафтно-геохимической мезокатене.

Ключевые слова: химические элементы, лугово-черноземные почвы, процессы, переувлажнение, Ставропольский край

Для цитирования: Дегтярева Т.В. Формирование микроэлементного состава почв Ставропольского края под воздействием процессов переувлажнения // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 2. С. 41–60. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.2>

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.01.2025;
одобрена после рецензирования 01.04.2025;
принята к публикации 20.06.2025.

1.6.12. Physical Geography and Biogeography, Soil Geography and Landscape Geochemistry (Geographical Sciences)
Research article

Formation of microelement composition of soils of Stavropol krai under the influence of waterlogging processes

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>

Abstract.

The object of the study was the hydromorphic soils of the Tashlyan-sky landscape of ravine forest-steppes, identified in the Stavropol Krai. The radial geochemical structure of differentiation of gross contents of Zn, Cu, Pb and Cd in the profile of meadow-chnozem soils formed under the influence of constant ground and seasonal surface moistening was studied. The features of lateral geochemi-

cal differentiation of microelements in meadow-chnozem soils in relation to the general lateral structure of migration of chemical elements, characteristic of the laid landscape-geochemical mesocatena within the Tashlyansky landscape, were also studied. The main methods were field and office analyses, analysis of scientific information on similar landscape-geochemical processes. The morphological characteristics and a number of physicochemical properties of meadow-chnozem soils have been established, which indicate the formation of differentiation in the soil profile by alkaline-acid conditions (there is a change from the neutral reaction of the environment in the humus horizon to a slightly alkaline one in the lower part of the soil profile) and oxidation-reduction conditions (there is a change from the oxidizing environment to a reducing gley environment). The radial differentiation structure of the total contents of Zn and Cu corresponds to the surface-accumulative distribution, which, together with the established statistically significant correlation coefficients with the humus content, indicates the fixation of Zn and Cu on the biogeochemical barrier as part of organomineral compounds. The radial differentiation structure of Pb and Cd is characterized by eluvial-illuvial distribution. The established correlation coefficients indirectly confirm the fixation of Pb and Cd as part of aluminosilicate clay minerals. Important phases-carriers of microelements in hydromorphic soils are oxides (hydroxides) of Fe and Mn, carbonates, easily soluble salts, which are visually determined in their profile. In the general picture of lateral differentiation of microelements along the landscape-geochemical mesocatena, meadow-chnozem soils act as low-contrast concentrators of Zn and Cu. More intensive radial migration of Pb and Cd from humus horizons in hydromorphic conditions affects the features of their lateral distribution along the landscape-geochemical mesocatena.

Keywords: chemical elements, meadow-chnozem soils, processes, waterlogging, Stavropol Krai

For citation: Degtyareva TV. Formation of microelement composition of soils of Stavropol Krai under the influence of waterlogging processes. Science. Innovations. Technologies. 2025;(2):41-60. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.2>

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

The article was submitted 21.01.2025;
approved after reviewing 01.04.2025;
accepted for publication 20.06.2025.

Введение

Микроэлементный состав почв представляет собой сложную систему почвенных соединений, включающих в себя разнообразные формы нахождения микроэлементов [1]. В той или иной степени в почвах представлены соединения микроэлементов с органическим веществом, с оксидами (гидроксидами) Fe и Mn, с алюмосиликатами в виде первичных или вторичных минералов, с карбонатами, легкорастворимыми солями [2, 3]. Во многом формирование микроэлементного состава почв определяется распределением данных фаз-носителей микроэлементов в почвенном профиле.

В связи с важностью проведения исследований по изучению микроэлементного состава почв для анализа способности почв восстанавливаться после техногенных воздействий, необходимым является учет гидроморфных местоположений. В условиях близкого залегания грунтовых вод либо интенсивного поверхностного поступления атмосферных осадков в почвах протекают процессы переувлажнения и заболачивания [4]. Очень часто это совпадает с более низким гипсометрическим уровнем поверхности почв, нахождением в нижней части склонов, пойменной части речных долин, западинах. За счет процессов переувлажнения в почвах гидроморфных местоположений создаются особые окислительно-восстановительные обстановки, влияющие на образование системы почвенных соединений микроэлементов. Их изучение позволяет получить полную картину формирования микроэлементного состава почв для территории Ставропольского края, где характерным является наличие гидроморфных почв в подчиненных ландшафтно-геохимических условиях миграции.

Цель исследования – определить особенности формирования микроэлементного состава почв в условиях переувлажнения, характерных для поймы реки Ташла на территории Ташлянского ландшафта байрачных лесостепей в Ставропольском крае с использованием материалов собственных полевых исследований и анализа научной литературы по данной тематике.

Материалы и методы исследований

Исследование проводилось в Ташлянском ландшафте байрачных лесостепей, выделенном В. А. Шальневым [5] в верховьях рек Ташла и Большая Кугульта. Закладывались полные почвенные разрезы по ландшафтно-геохимической мезеокатене, включившей в себя автономные (А), трансэлювиальные (ТЭ) и трансэлювиально-аккумулятивные (ТЭА) элементарные ландшафты (рис. 1). Автономный ландшафт водораздельной поверхности останцового плато и трансэлювиальный ландшафт склонов останцового плато сложены элювиально-делювиальными отложениями и делювиальными лессовидными суглинками. Здесь под луговой разнотравно-дерновиннозлаковой степью сформированы черноземы типичные. Трансэлювиально-аккумулятивный ландшафт выположенно-го склона к пойме реки Ташлы сложен делювиально-аллювиальными отложениями; под мезофильными лугами развиты лугово-черноземные почвы.

Почвенно-геохимическое опробование состояло из отбора почвенных проб по генетическим горизонтам почв, их первичной пробоподготовки и проведения лабораторных анализов. Определялись щелочно-кислотные условия (рН водной вытяжки) методом потенциометрии; содержание органического вещества (гумуса) методом мокрого озоления по И. В. Тюрину; гранулометрический состав методом лазерной дифрактометрии. Валовые содержания Cu, Zn, Pb и Cd определены методом рентгенфлуоресцентного анализа на спектрометре «Xenometrix EX-Calibur».

При определении особенностей радиального распределения микроэлементов использован коэффициент радиальной дифференциации (R), равный отношению содержания химического элемента в генетическом горизонте почв к его содержанию в почвообразующей породе или горизонте ВС. При анализе радиальной дифференциации содержание микроэлементов, монотонно уменьшающееся с глубиной, принято за поверхностно-аккумулятивное распределение; при наличии максимумов и минимумов содержания металлов в средней части почв распределение отнесено к элювиально-иллювиальному.

Помимо лабораторных анализов, проведен литературный анализ имеющейся научной информации по микроэлементному составу почв в гидроморфных условиях [6–9]. В этих работах установле-

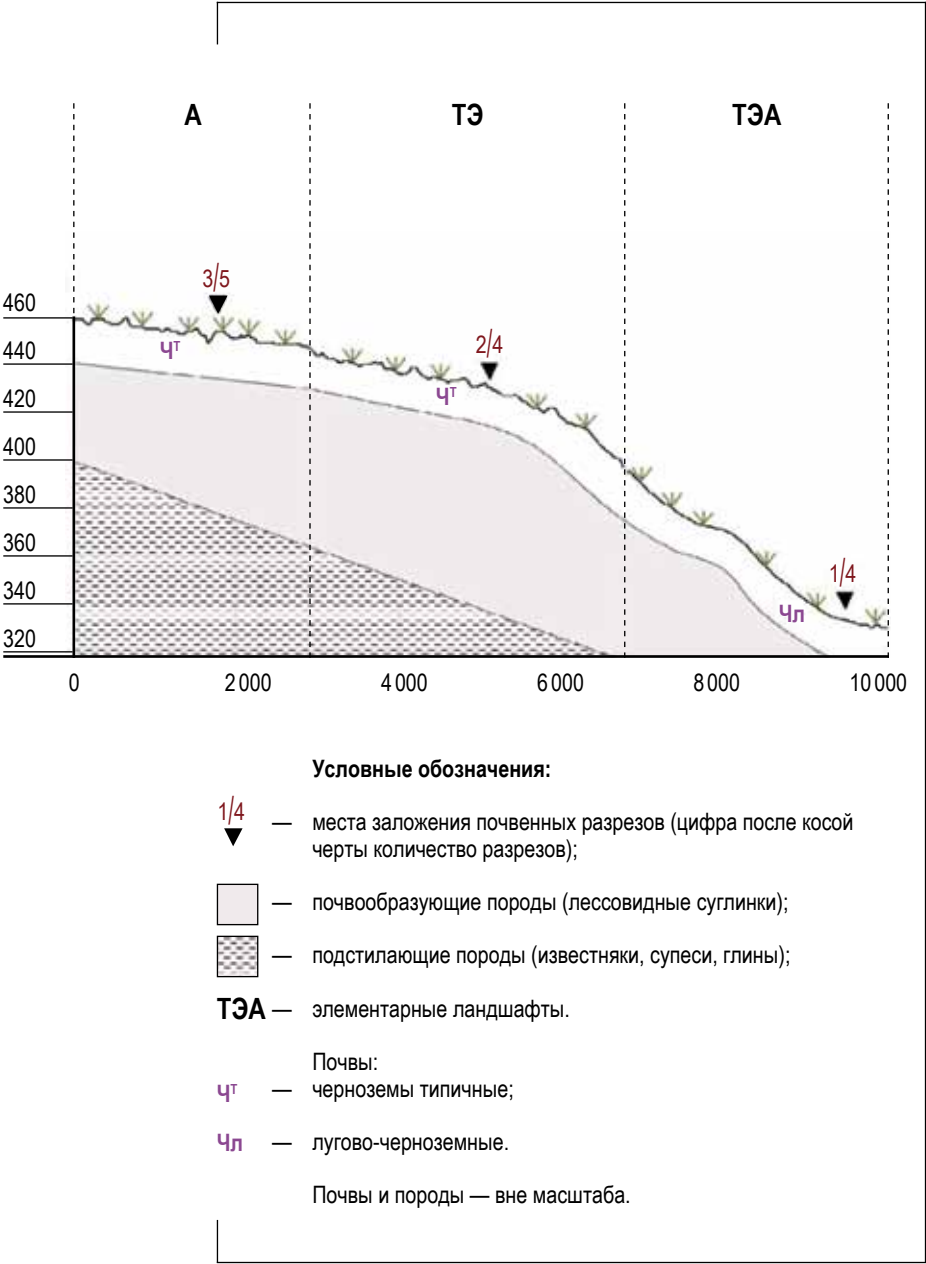


Рис. 1. Схематический профиль ландшафтно-геохимической мезокатены в Ташлянском ландшафте байрачных лесостепей.

Fig.1. Schematic profile of landscape-geochemical mesocatena in Tashlyansky landscape of ravine forest-steppes.

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

ны основные почвообразовательные процессы, влияющие на формирование микроэлементного состава лугово-черноземных почв: гумусообразование и гумусонакопление, биогенная аккумуляция, миграция карбонатов с их аккумуляцией в нижней части профиля и, в меньшей мере, – выщелачивание, лессиваж, оглинивание и гидрогенная миграция [7, 8].

Радиальная дифференциация микроэлементов в профиле рассматриваемых почв согласно литературным данным неоднозначна. Н. С. Горбунова и Н. А. Протасова отмечают, что «валовый Zn, валовая и подвижная Cu концентрируется преимущественно в верхних горизонтах за счет биогенной аккумуляции; также в карбонатном горизонте наблюдается некоторое увеличение концентрации валового Zn и подвижной Cu, где они способны аккумулироваться в результате взаимодействия с карбонатами почвенного раствора» [8]. Б. П. Ахтырцев с соавторами для лугово-черноземных почв приводят данные по поверхностно-аккумулятивному распределению подвижной Cu, равномерному и элювиально-иллювиальному распределению подвижного Zn [10].

Результаты исследований и их обсуждение

Район исследования относится к Ставропольской возвышенности (Центральное Предкавказье), для которой характерен пересеченный рельеф в силу особенностей размыва подстилающих пород в четвертичный период. Более устойчивые пласты плотных карбонатных пород в настоящее время образуют платообразные останцовые поверхности выравнивания верхнесарматского и акчагыльского времени формирования. Речные долины и балки занимают участки с выходами глин разного происхождения. Гидроморфные (лугово-черноземные) почвы приурочены к нижним частям выходящих склонов, к днищам водоносных балок с выходами грунтовых вод, к надпойменным террасам рек. На их формирование влияет как грунтовое увлажнение, так и поверхностное поступление избыточного количества осадков в результате их интенсивного выпадения.

Климатические условия района исследования являются умеренно континентальными, с годовым количеством осадков 558–636 мм, суммой активных температур более 10° – 3306 °С, ГТК – 1,09, КУ – 0,8 [11]. Высокое количество осадков совпадает с их не-

устойчивым характером поступления в течение года. Формируется периодически промывной тип водного режима, в условиях которого в почвах сочетаются биогенно-аккумулятивные и элювиально-иллювиальные процессы [6].

Растительность представлена разнотравно-дерновиннозлаковой степью, в условиях переувлажнения произрастает луговая ассоциация, включающая келерию стройную *Koeleria cristata*, осоку низкую *Carex humilis*, овсяницу валлисскую *Festuca valesiaca*, тимфеевку степную *Phleum phleoides*, костер береговой *Bromopsis riparia* [12]. Местами формируются заросли из тростника южного *Phragmites australis*, рогоза широколистного *Typha latifolia* и другой влаголюбивой флоры, свидетельствующие о близком к поверхности расположении грунтовых вод в течение всего года.

Почвообразующими породами для гидроморфных почв Ташлянского ландшафта байрачных лесостепей являются делювиально-аллювиальные глинистые и тяжелосуглинистые отложения сармата [11]. Согласно классификации почвообразующих комплексов пород Северного Кавказа В. В. Дьяченко [13], эти отложения относятся к терригенным почвообразующим комплексам неогена. Их геохимическая специфика в сравнении с кларками химических элементов в верхней части континентальной земной коры [14] характеризуется концентрацией Pb, рассеиванием Zn и Cu (табл. 1).

Рассматривая свойства гидроморфных лугово-черноземных почв Ташлянского ландшафта байрачных лесостепей, следует отметить большую мощность гумусового горизонта А (39–42 см), черный цвет почвенных агрегатов, хорошо выраженную структуру, присутствие глубинной глееватости, признаков вторичного окarbonачивания с появлением псевдомицелия в гумусовом горизонте. Морфологическое описание почвенного профиля лугово-черноземных почв Ташлянского ландшафта байрачных лесостепей представлено ниже описанием разреза, заложенного в нижней выположенной части склона к пойме реки Ташла под зарослями тростника южного *Phragmites australis*, рогоза широколистного *Typha latifolia*: Ад 0–6 (6) см. Черновато-темносерый, влажный, тяжелосуглинистый. Комковато-зернистый, слабо уплотненный, вертикальные трещины. Густо пронизан корнями. Переход к нижележащему горизонту постепенный.

Таблица 1.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ СПЕЦИФИКА ПОЧВООБРАЗУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ ПОРОД НЕОГЕНА, РАЗВИТЫХ НА ТЕРРИТОРИИ ЛЕСОСТЕПНЫХ ЛАНДШАФТОВ ПРЕДКАВКАЗЬЯ

Table 1. Geochemical specificity of soil-forming complexes of Neogene rocks developed in the territory of forest-steppe landscapes of the Ciscaucasia

Почвообразующие комплексы	Сравнение с кларком в верхней части континентальной земной коры [14]	
	Кларк концентрации	Кларк рассеивания
Терригенные неогена	Pb1,6	Zn1,3 Cu1,1

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

- А 6–39 (33) см. Черновато-темносерый со слабым гляncем, влажный, тяжелосуглинистый. Комковато-зернистый, уплотненный, вертикальные трещины. Ржавые мелкие конкреции, железистые пленки по граням структурных отдельностей, многочисленные скопления псевдомицелия с 19 см. Переход слабозаметный постепенный. Вскипание от 10% HCl с 15 см.
- AB1 39–64 (25) см. Темный буро-серый, влажный, тяжелосуглинистый. Комковато-призматический, уплотненный. Переход слабозаметный постепенный.
- AB2 64–95 (31) см. Темнее предыдущего, черноватый, мокрый, тяжелосуглинистый, бесструктурный, уплотненный. Скопления солей, псевдомицелия, железистых мелких конкреций. Переход постепенный.
- BC 95–119 (24) см. Буро-сизый, мокрый, тяжелосуглинистый, бесструктурный, уплотненный. Белоглазка с 115 см. Переход постепенный.
- BC 119 (дно разреза) см. Оливково-бурая почвообразующая порода.
- Почва: Лугово-черноземная мощная тяжелосуглинистая.

Физико-химические свойства лугово-черноземных почв трансэлювиально-аккумулятивного ландшафта ландшафтно-геохимической мезокатены в Ташлянском ландшафте байрачных лесостепей характеризуются нейтральной реакцией среды в гумусовом горизонте ($pH = 7,2 \pm 0,14$), которая с глубиной становится слабощелочной с $pH = 7,9 \pm 0,1$ (табл. 2). Установлено повышенное (относительно автоморфных почв) содержание гумуса ($3,5 \pm 0,5\%$), постепенно снижающееся с глубиной. Определен тяжелосуглинистый гранулометрический состав с количеством фракции физической глины $47,9 \pm 7,1\%$. Обращает на себя внимание наличие на глубине 60–70 см от поверхности скопления кристалликов легкорастворимых солей, мелких железистых конкреций. Это свидетельствует о глубине сезонного промачивания почвенного профиля и глубине проникновения окислительных условий миграции химических элементов. С глубины 95 см сформирован глеевый горизонт бурого цвета, т. е. условия миграции химических элементов становятся восстановительными. Почвам свойственен и периодически поверхностный застой влаги, который проявляется в признаках поверхностного сезонного оглеения в слое 0–6 см: мелких железистых конкрециях, железистых пленках по граням структурных отдельностей, ожелезнении растительных остатков.

Микроэлементный состав лугово-черноземных почв Ташлянского ландшафта байрачных лесостепей показан на рисунке 2. Содержание микроэлементов характеризуется превышением кларка почв мира [15] для Zn (кларк концентрации равен 1,5), Cu (кларк концентрации – 2,4), Pb (кларк концентрации – 2,9) и Cd (кларк концентрации – 1,4).

Радиальная дифференциация микроэлементов в лугово-черноземных почвах различна (табл. 3). Zn распределяется по почвенному профилю по поверхностно-аккумулятивному характеру ($R = 1,5$), что свидетельствует о связи микроэлемента с органоминеральными комплексами. Известно, что Zn в гидроморфных почвах образует прочные Zn-органические соединения [16]. Также весьма многочисленными являются сульфиды Zn в засоленных почвах [2]. Валовое содержание Zn в почвах Предкавказья является высоким и объясняется его поступлением с первичными минералами [3]. Многие факторы (наличие карбонатов, легкорастворимых солей, биогенное ак-

Таблица 2.

СРЕДНИЕ И МЕДИАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ, КОЭФФИЦИЕНТЫ
ВАРИАЦИИ (CV) ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛУГОВО-
ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ ТАШЛЯНСКОГО ЛАНДШАФТА

Table 2. Average and median values, coefficients of variation (cv)
of physical and chemical properties of meadow-chernozem soils
of the Tashlyan landscape

Горизонт	pH водной вытяжки			Содержание гумуса, %			Физическая глина, %		
	среднее	медиана	cv	среднее	медиана	cv	среднее	медиана	cv
A	7,2±0,1	7,25	0,25	3,5±0,5	3,7	0,142	47,9±7,1	47,5	0,148
AB2	7,5±0,1	7,5	0,017	2,7±0,3	2,75	0,117	51,8±6,5	54	0,126
BC	7,9±0,1	7,85	0,07	1,5±0,2	1,45	0,144	54±4,7	54,8	0,088

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

кумуляции в составе прочных органо-минеральных комплексов) способствуют связыванию Zn в малоподвижные соединения в почвах и его слабой радиальной миграции. В гидроморфных почвах также образуются многочисленные соединения Zn с оксидами (гидроксидами) Fe и Mn, которые также связывают микроэлемент в неподвижные формы. В целом, это приводит к дефициту подвижных форм Zn в почвах Центрального Предкавказья [17].

Корреляционный анализ с использованием всей совокупности данных по ландшафтно-геохимической мезокатене Ташлянского ландшафта байрачных лесостепей показал статистически значимые ($p < 0,05$) связи между валовым содержанием Zn и содержанием органического углерода ($r = 0,59$; $n = 39$), которые подтверждают возможное нахождение соединений Zn на биогеохимическом барьере. Также установлены корреляции валового содержания Zn с величиной pH ($r = -0,57$; $n = 39$) и фракцией физической глины ($r = 0,19$; $n = 39$). Латеральная дифференциация валового содержания Zn в гидроморфных почвах ландшафтно-геохимической мезокатены ха-

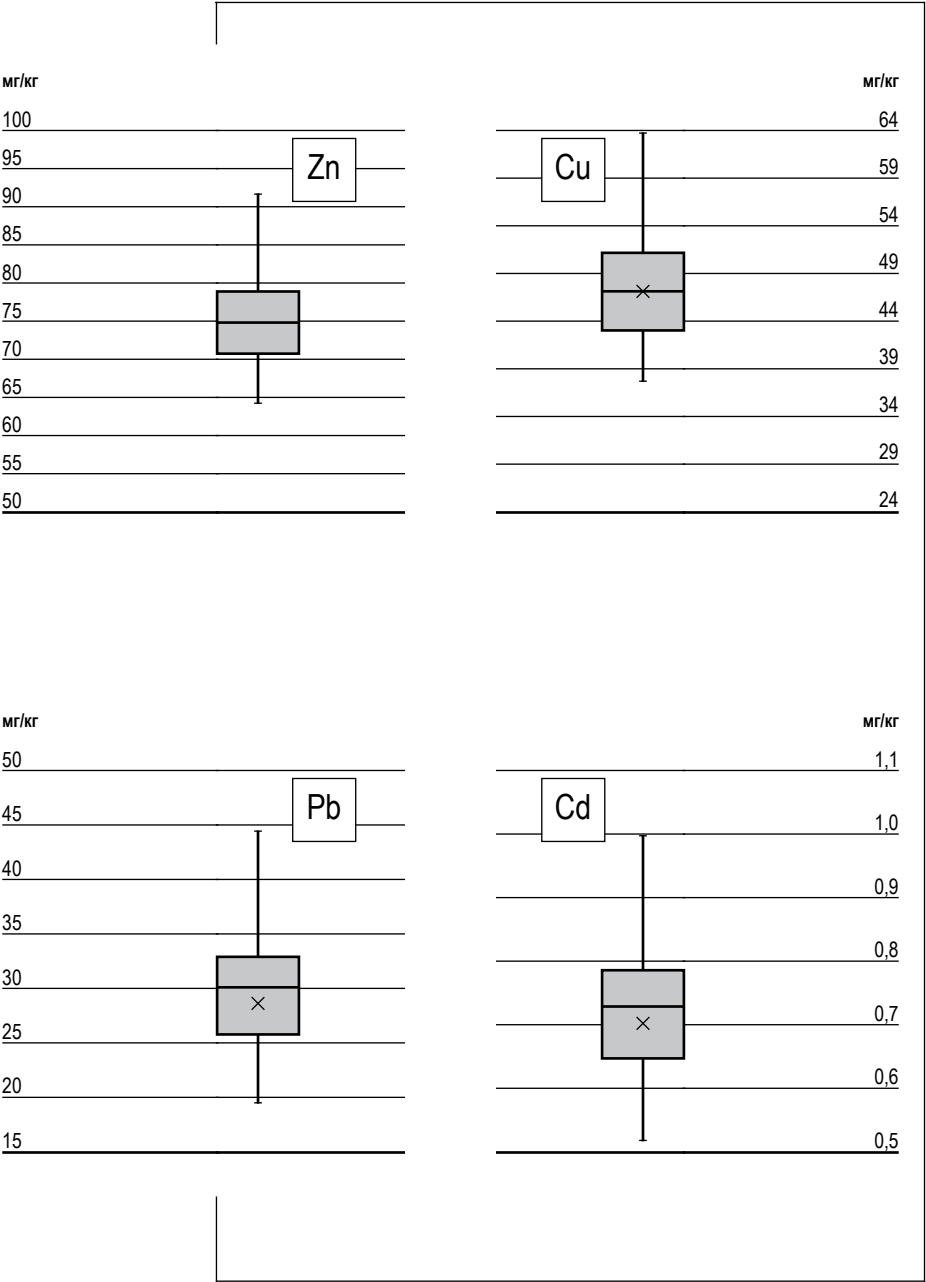


Рис. 2. Средние значения валовых содержаний микроэлементов в лугово-черноземных почвах Ташлянского ландшафта.
Fig. 2. Microelement composition of meadow-chernozem soils of the Tashlyansky landscape of ravine forest-steppes.

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

Таблица 3.

МЕДИАННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТЫ ВАРИАЦИИ (CV)
ВАЛОВЫХ СОДЕРЖАНИЙ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ
В ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВАХ ТАШЛЯНСКОГО ЛАНДШАФТА
Table 3. Median values and coefficients of variation (cv) of gross contents
of microelements in meadow-chernozem soils of the Tashlyansky
landscape

Горизонт	Zn		Cu		Pb		Cd	
	медиана, мг/кг	cv	медиана, мг/кг	cv	медиана, мг/кг	cv	медиана, мг/кг	cv
A	74,95	0,113	47,15	0,17	30,3	0,231	0,73	0,195
AB2	57,15	0,121	40,2	0,185	31,8	0,138	0,73	0,072
BC	48,85	0,142	37,2	0,147	42,8	0,22	0,845	0,292

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

рактируется малой контрастностью: значение коэффициента латеральной дифференциации L составляет 1,2. Это свидетельствует о значительной сорбционной емкости почв вышерасположенных автономных и трансэлювиальных ландшафтов.

Радиальная дифференциация валового содержания Cu также происходит в соответствии с поверхностно-аккумулятивным распределением ($R = 1,3$). Cu является биофильным микроэлементом, активно участвующим во многих биогеохимических процессах в живых организмах [18]. В связи с этим, возможно предположить закрепление Cu в составе органоминеральных комплексах на биогеохимическом барьере в гумусовом горизонте лугово-черноземных почв. Известно также, что Cu в почвах связывается с глинистыми минералами, оксидами (гидроксидами) Fe и Mn, карбонатами [3, 19]. Корреляционный анализ с использованием данных по всей ландшафтно-геохимической мезокатене Ташлянского ландшафта вы-

явил статистически значимые ($p < 0,05$) коэффициенты корреляции валового содержания Cu с гумусом ($r = 0,56$; $n = 39$), с величиной pH ($r = -0,4$; $n = 39$) и фракцией физической глины ($r = -0,37$; $n = 39$). Латеральная дифференциация валового содержания Cu в гидроморфных лугово-черноземных почвах относительно автоморфных почв характеризуется незначительным увеличением ($L = 1,1$).

Для валового содержания Pb в профиле лугово-черноземных почв определено элювиально-иллювиальное распределение с увеличением содержания микроэлемента в горизонте BC ($R = 0,7$). Аналогичный характер распределения Pb установлен и другими авторами для гидроморфных почв [9]. Возможно предположить выщелачивание Pb под действием гидрогенных процессов из верхней части почвенного профиля и его закрепление на слабом щелочном и восстановительном глеевом внутрипочвенных геохимических барьерах. Фазами-носителями Pb в почвах являются карбонаты, оксиды (гидроксиды) Fe и Mn , алюмосиликатные минералы, в меньшей степени – органическое вещество [20, 21]. В гидроморфных условиях Pb образует соединения с легкорастворимыми солями.

Установлены очень слабые корреляции между валовым содержанием Pb и фракцией физической глины ($r = 0,13$; $n = 39$). Латеральная дифференциация валового содержания Pb в лугово-черноземных почвах ландшафтно-геохимической мезокатены относительно черноземов типичных малоконтрастна: $L = 0,9$. Вероятно, это связано с более интенсивным радиальным перемещением микроэлемента вглубь почвенного профиля в условиях переувлажнения, характерного для лугово-черноземных почв.

Валовое содержание Cd в профиле лугово-черноземных почв также имеет элювиально-иллювиальное распределение с незначительным накоплением в средней части почвенного профиля ($R = 0,9$). В гидроморфных условиях почвообразования Cd наиболее подвижен из рассматриваемых микроэлементов. Основные фазы-носители микроэлемента в почвах – карбонаты, органоминеральные комплексы, алюмосиликаты, соединения Fe и Mn [22, 23]. Корреляции валового содержания Cd со свойствами почв ландшафтно-геохимической мезокатены Ташлянского ландшафта байрачных лесостепей очень слабые: с гумусом $r = 0,13$; с величиной pH – $r = -0,11$; с содер-

жанием фракции физической глины – $r = 0,15$ ($n = 39$). Латеральной аккумуляции Cd в лугово-черноземных почвах, выступающих в качестве подчиненных по отношению к типичным черноземам в ландшафтно-геохимической мезокатене Ташлянского ландшафта, не установлено ($L = 0,9$). К такой особенности латеральной дифференциации Cd приводит его высокая миграционная подвижность в гидроморфных лугово-черноземных почвах, в результате чего верхние горизонты содержат меньшее количество микроэлемента, который накапливается на внутрипочвенных слабом щелочном, восстановительном глеевым и сорбционным геохимическим барьерах.

Заключение

Проведенное почвенно-геохимическое изучение микроэлементного состава гидроморфных лугово-черноземных почв Ташлянского ландшафта байрачных лесостепей на территории Ставропольского края показало особенности, присущие формированию почвенных соединений микроэлементов в условиях переувлажнения. Избыточное поступление воды в почвы в результате грунтового или периодически проявляющегося поверхностного увлажнения приводит к образованию в почвенном профиле нескольких геохимических барьеров, на которых микроэлементы закрепляются в форме различных соединений. В лугово-черноземных почвах за счет поступления значительной массы растительного опада и ее гумификации происходит формирование биогеохимического барьера, на котором биогенной аккумуляции подвергаются Zn и Cu. Интенсивные процессы вторичного окарбоначивания вызывают подъем легкорастворимых углекислых солей и их выпадение в виде псевдомицелия в пределах гумусового горизонта. Смена окислительной обстановки на восстановительную глеевую в середине почвенного профиля приводит к образованию восстановительного глеевого геохимического барьера, который частично совмещается с сорбционным и слабым щелочным геохимическими барьерами. Закрепление на данных геохимических барьерах характерно для Pb и Cd.

Основными фазами-носителями микроэлементов в гидроморфных почвах лесостепных ландшафтов Ставропольского края являются органическое вещество, оксиды (гидроксиды) Fe и Mn, алю-

мосиликатные глинистые минералы, карбонаты. Их профильное распределение приводит к специфической радиальной дифференциации связанных с ними микроэлементов и влияет на особенности латеральной геохимической структуры в пределах изученной ландшафтно-геохимической мезокатены Ташлянского ландшафта байрачных лесостепей.

Проведенное исследование формирования микроэлементного состава почв Ставропольского края в условиях переувлажнения, свойственного гидроморфным местоположениям, показало общий характер радиальной и латеральной геохимических структур дифференциации микроэлементов в зависимости от развивающихся в почвенной толще процессов. Необходимость такого изучения определяется важностью понимания всей картины образования системы почвенных соединений микроэлементов в современных ландшафтах, включающих в себя как автоморфные, так и гидроморфные почвы.

Список источников

1. Мотузова Г. В. Соединения микроэлементов в почвах: системная организация, экологическое значение, мониторинг. Москва: Книжный дом «Либроком». 2009. 168 с.
2. Водяницкий Ю. Н. Природные и техногенные соединения тяжелых металлов в почвах // Почвоведение. 2014. №4. С. 420–432. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14040108>
3. Минкина Т. М., Мотузова Г. В., Назаренко О. Г. Состав соединений тяжелых металлов в почвах. Ростов-на-Дону: Изд-во «Эверест», 2009. 208 с.
4. Щеглов Д. И., Брехова Л. И. Процессы почвообразования. Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2016. 58 с.
5. Шальнев В. А. Ландшафты Ставропольского края. Ставрополь: Изд-во СГПУ, 1995. 52 с.
6. Протасова Н. А. Микроэлементы в черноземах и серых лесных почвах Центрального Черноземья: автореф. дис. ... докт. биол. наук: 03.00.27 / Протасова Нина Алексеевна. Воронеж, 2002. 40 с.
7. Протасова Н. А., Щербаков А. П. Микроэлементы (Ti, Mn, Cr, V, Ni, Zn, Cu, Co, Mo, Be, Ba, Sr, Zr, Ga, B, I) в черноземах и серых лесных почвах Центрального Черноземья. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 2003. 368 с.

8. Горбунова Н. С., Протасова Н. А. Формы соединений марганца, меди и цинка в черноземах Центрально-Черноземного региона // Вестник Воронежского государственного университета. Серия Химия. Биология. Фармация. 2008. № 2. С. 77–85.
9. Сосорова С. Б., Кашин В. К. Свинец в почвах дельты реки Селенга // Почвоведение. 2021. № 2. С. 196–210.
10. Ахтырцев Б. П., Ахтырцев А. Б., Яблонских Л. А. Тяжелые металлы и радионуклиды в гидроморфных почвах лесостепи Русской равнины и их профилное распределение // Почвоведение. 1999. № 4. С. 435–444.
11. Кулинцев В. В., Годунова Е. И., Желнакова Л. И. и др. Система земледелия нового поколения Ставропольского края. Ставрополь: АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2013. 520 с.
12. Дзыбов Д. С. Растительность Ставропольского края. Ставрополь: АГРУС, 2018. 492 с.
13. Дьяченко В. В. Геохимия, систематика и оценка состояния ландшафтов Северного Кавказа. Ростов-на-Дону: Комплекс, 2004. 268 с.
14. Виноградов А. П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
15. Виноградов А. П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР. 1957. 238 с.
16. Martinez C. E., Bazilevskaya K. A., Lanzirrotti A. Zinc coordination to multiple ligand atoms in organic rich surface soils // Environ. Sci. Technol. 2006. Vol. 40. P. 5688-5695.
17. Гречишкина Ю. И. Сохранение и воспроизводство плодородия черноземных почв для повышения продуктивности агроценозов Центрального Предкавказья: дис. ... д-ра с.-х. наук: 06.01.04 // Гречишкина Юлия Ивановна. Ставрополь, 2020. 469 с.
18. Баргальи Р. Биогеохимия наземных растений: экофизиологический подход к биомониторингу и биовосстановлению / под ред. Н. С. Касимова. Москва: ГЕОС, 2005. 456 с.
19. Covelo E., Vega F., Andrade M. Competitive sorption and desorption of heavy metals by individual soil components // Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 140. P. 308-315.
20. Понизовский А. А., Мироненко Е. В. Механизмы поглощения свинца (II) почвами // Почвоведение. 2001. № 4. С. 418–429.

21. Bradl H. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 277. P. 1-18.
22. Zachara JM, Cowan CE, Resh CT. Sorption of divalent metals on // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991. Vol. 55. No. 6. P. 1549-1562.
23. Дегтярева Т. В., Соляник Е. Н., Мельничук В. В., Ляшенко Е. А. Формирование микроэлементного состава почв полупустынных ландшафтов Ставропольского края // *Наука. Инновации. Технологии*. 2022. №2. С. 73–88. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2022.2.4>

References

1. Motuzova GV. Joints of microelements in soils: system organization, environmental significance, monitoring. Moscow: Book House "Librock"; 2009. 168 p. (In Russ.).
2. Vodyanitsky YuN. Natural and technogenic compounds of heavy metals in soils. *Eurasian Soil Science*. 2014;(4):420-432. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032180X14040108>
3. Minkina TM, Motuzova GV, Nazarenko OG. Composition of heavy metal compounds in soils. Rostov-on-Don: Publishing house «Everest»; 2009. 208 p. (In Russ.).
4. Shcheglov DI, Brekhova LI. Soil formation processes. Voronezh: VSU Publishing House; 2016. 58 p. (In Russ.).
5. Shalnev VA. Landscapes of Stavropol Krai. SGPU Publishing House; 1995. 52 p. (In Russ.).
6. Protasova NA. Microelements in chernozems and gray forest soils of the Central Chernozem Region: author's abstract dissertation of dr. boil. sciences: 03.00.27. Voronezh; 2002. 40 p.
7. Protasova NA, Shcherbakov AP. Microelements (Ti, Mn, Cr, V, Ni, Zn, Cu, Co, Mo, Be, Ba, Sr, Zr, Ga, B, I) in chernozems and gray forest soils of the Central Chernozem Region. Voronezh: Voronezh University Publishing House; 2003. 368 p. (In Russ.).
8. Gorbunova NS, Protasova NA. Forms of manganese, copper and zinc compounds in chernozems of the Central Black Earth Region. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Chemistry. Biology. Pharmacy*. 2008;(2):77-85. (In Russ.).
9. Sosorova SB, Kashin VK. Lead in soils of the Selenga River delta. *Eurasian Soil Science*. 2021;(2):196-210.
10. Akhtyrtsev BP, Akhtyrtsev AB, Yablonskikh LA. Heavy metals and radionuclides in hydromorphic soils of the forest-steppe of

- the Russian Plain and their profile distribution. *Eurasian Soil Science*. 1999;(4):435-444.
11. Kulintsev VV, Godunova EI, Zhelnakova LI, et al. New generation farming system of Stavropol Krai. Stavropol: AGRUS of Stavropol State Agrarian University; 2013. 520 p. (In Russ.).
 12. Dzybov DS. Vegetation of Stavropol Krai. Stavropol: AGRUS; 2018. 492 p. (In Russ.).
 13. Dyachenko VV. Geochemistry, systematics and assessment of the state of landscapes of the North Caucasus. Rostov-on-Don: Complex; 2004. 268 p. (In Russ.).
 14. Vinogradov AP. Average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the earth's crust. *Geochemistry*. 1962;(7):555-571. (In Russ.).
 15. Vinogradov AP. Geochemistry of rare and dispersed chemical elements in soils. Moscow: Publishing house of the USSR Academy of Sciences; 1957. 238 p. (In Russ.).
 16. Martinez CE, Bazilevskaya KA, Lanzirotti A. Zinc coordination to multiple ligand atoms in organic rich surface soils. *Environ. Sci. Technol*. 2006;40: 5688-5695.
 17. Grechishkina Yul. Preservation and reproduction of the fertility of chernozem soils to increase the productivity of agroecosystems of the Central Ciscaucasia: dissertation of dr. agricult. sciences: 06.01.04. Stavropol; 2020. 469 p.
 18. Bargalyi R. Biogeochemistry of terrestrial plants: an ecophysiological approach to biomonitoring and biore restoration. Edited by NS. Kasimov. Moscow: GEOS; 2005. 456 p. (In Russ.).
 19. Covelo E, Vega F, Andrade M. Competitive sorption and desorption of heavy metals by individual soil components. *Journal of Hazardous Materials*. 2007;140:308-315.
 20. Ponizovsky AA, Mironenko EV. Mechanisms of lead (II) absorption by soils. *Eurasian Soil Science*. 2001;(4):418-429. (In Russ.).
 21. Bradl H. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004;277:1-18.
 22. Zachara JM, Cowan CE, Resh CT. Sorption of divalent metals on calcite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1991;55(6):1549-1562.
 23. Degtyareva TV, Solyannik EN, Melnichuk VV, Lyashenko EA. Formation of microelement composition of soils of semi-desert landscapes of Stavropol Krai. *Science. Innovations. Technologies*. 2022;(2):73-88. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2022.2.4>

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.

Вклад автора

Татьяна Васильевна Дегтярева. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных. Подготовка и редактирование текста, формирование его окончательного варианта.

Information about the author

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

Contribution of the author

Tatyana V. Degtyareva. Conducting research – collecting, interpreting and analyzing the obtained data. Preparing and editing the text, forming its final version.



Научная статья

УДК 556.18

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.3>

ГЕОЗООЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИХТИОФАУНЫ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ КУБАНСКОГО РЕЧНОГО БАСЕЙНА (на материалах Карачаево-Черкесской Республики)

Асланбек Заурбекович Керевов¹,
Юрий Петрович Костин²,
Роман Сергеевич Губанов^{3*}

1, 2, 3 Главрыбвод, Северо-Кавказский филиал (д. 79 А, ул. Пушкина, 360051, г. Нальчик, Российская Федерация)

¹ skf@skf.glavrybvod.ru; <https://orcid.org/0009-0007-5082-7873>

² stav@skf.glavrybvod.ru; <https://orcid.org/0009-0000-0966-3490>

³ guevara78@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2569-4550>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Статья посвящена геоэкологической характеристике горных рек Кубанского речного бассейна в границах Карачаево-Черкесской Республики. Водообеспеченность Карачаево-Черкесской Республики на фоне других южных субъектов Российской Федерации выделяется значительно широкой сетью рек. По территории республики протекает 419 рек, относящихся к двум бассейнам: Азово-Черноморскому и Каспийскому, а также имеется свыше 130 озер. Все реки Азово-Черноморского бассейна являются притоками различного порядка реки Кубань. Наиболее крупными притоками первого порядка являются реки: Теберда, Малый Зеленчук и Большой Зеленчук, Уруп, Лаба [4]. В настоящее время реки бассейна реки Кубань являются хорошо изученными водными объектами, однако, в виду значительной протяженности рек их верховья изучены слабо. Это связано с тем, что большинство ихтиологических исследований направлены на исследование трансформации ихтиофауны и кормовой базы, в связи со строительством гидротехнических сооружений: водохранилищ, каналов, ГЭС и т.д. или изучением сокращения популяций осетровых рыб, в виду отсутствия путей миграции. Целью данного исследования является изучение ихтиофауны, кормовой базы и среды обитания Верхней Кубани и верхнего течения реки – притоков. Объектом исследования является гидробионты горных рек Карачаево-Черкесской Республики. Во время проведения гидробиологических полевых исследований, использовались общепринятые методики исследований. Идентификация ви-

довой принадлежности рыбы проводилась по соответствующим определителям (Атлас, 2003; Берг, 1948-1949; Кузнецов, 1973; Веселов, 1977; Kottelat, Freyhof, 2007 и др.), согласно современной классификации (Решетников и др., 1997; Решетников и др., 2003; Шахмурзов и др., 2012; Kottelat, Freyhof, 2007). Сбор водных беспозвоночных животных проводился с использованием общепринятых гидробиологических методик (Липин, 1950; Мартынов, 1952; Лепнева, 1968; Лукин, 1976; Фомин, 2000; Цалолихин, 1994-2004 и др.). Главный результат работы – составление геоэкологической характеристики ихтиофауны верховьев реки Кубань. Исследования рек верхнего течения реки Кубань подтверждают то, что ихтиофауна представлена почти исключительно ручьевой форелью.

Ключевые слова: животное население, ихтиофауна, гидрологический режим, местообитание, фитопланктон, зоопланктон, зообентос

Для цитирования: Кереев А. З., Костин Ю. П., Губанов Р. С. Геоэкологическая характеристика ихтиофауны водных объектов Кубанского речного бассейна (на материалах Карачаево-Черкесской Республики) // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 2. С. 61–80. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.3>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.02.2025;
одобрена после рецензирования 20.04.2025;
принята к публикации 19.06.2025.

1.6.12. Physical Geography and Biogeography, Soil Geography and Landscape Geochemistry (Geographical Sciences) Research article

Geozoological characteristics of the ichthyofauna of the water bodies of the Kuban river basin (based on the materials of the Karachay-Cherkess Republic)

**Aslanbek Z. Kerefov¹,
Yuri P. Kostin²,
Roman S. Gubanov^{3*}**

^{1, 2, 3} Glavrybvod, North Caucasus Branch (79 A, Pushkin St., 360051, Nalchik, Russian Federation)

¹ skf@skf.glavrybvod.ru; <https://orcid.org/0009-0007-5082-7873>;

² stav@skf.glavrybvod.ru; <https://orcid.org/0009-0000-0966-3490>;

³ guevara78@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-2569-4550>;

* Corresponding author

Abstract.

The article studies geozoological characteristics of the mountain rivers of the Kuban River basin within the borders of the Karachay-Cherkess Republic. The water availability of the Karachay-Cherkess Republic stands out from other southern regions of the Russian Federation with a significantly wide network of rivers. There are 419 rivers flowing through the territory of the republic, belonging to two basins: the Azov-Black Sea and the Caspian, and there are also over 130 lakes. All the rivers of the Azov-Black Sea basin are tributaries of various orders of the Kuban River. The largest tributaries of the first order are the rivers: Teberda, Maly Zelenchuk and Bolshoy Zelenchuk, Urup, Laba [4]. Currently, the rivers of the Kuban River basin are well-studied water bodies, however, due to the considerable length of the rivers, their upper reaches have been poorly studied. This is due to the fact that most ichthyological studies are aimed at studying the transformation of the ichthyofauna and the food supply, in connection with the construction of hydraulic structures: reservoirs, canals, hydroelectric power plants, etc. or studying the reduction of populations of sturgeon fish, due to the lack of migration routes. The purpose of this study is to study the ichthyofauna, food supply and habitat of the Upper Kuban and the upper reaches of the tributary river. The object of the study is the hydrobionts of the mountain rivers of the Karachay-Cherkess Republic. During the hydrobiological field research, generally accepted research methods were used. The identification of the fish species was carried out according to the appropriate determinants (Atlas, 2003; Berg, 1948-1949; Kuznetsov, 1973; Veselov, 1977; Kottelat, Freyhof, 2007, etc.), according to the modern classification (Reshetnikov et al., 1997; Reshetnikov et al, 2003; Shakhmurzov et al, 2012; Kottelat, Freyhof, 2007). The collection of aquatic invertebrates was carried out using generally accepted hydrobiological methods (Lipin, 1950; Martynov, 1952; Lepneva, 1968; Lukin, 1976; Fomin, 2000; Tsalolikhin, 1994–2004, etc.). The main result of the work was the compilation of geozoological characteristics of the ichthyofauna of the upper reaches of the Kuban River. Studies of the rivers of the upper reaches of the Kuban River confirm that the ichthyofauna is represented almost exclusively by brook trout.

Keywords:

animal population, ichthyofauna, hydrological regime, habitat, phytoplankton, zooplankton, zoobenthos

For citation:

Kerefov AZ, Kostin YuP, Gubanov RS. Geozoological characteristics of the ichthyofauna of the water bodies of the Kuban River Basin (based on the materials of the Karachay-Cherkess Republic). Science. Innovations. Technologies. 2025;(2):61-80 (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.3>

Conflict of interest:

the authors declare no conflicts of interests.
The article was submitted 20.02.2025;
approved after reviewing 20.04.2025;
accepted for publication 19.06.2025.

Введение

Водообеспеченность Карачаево-Черкесской Республики на фоне других южных субъектов Российской Федерации выделяется значительно широкой сетью рек. По территории республики протекает 419 рек, относящихся к двум бассейнам: Азово-Черноморскому и Каспийскому, а также имеется свыше 130 озер. Все реки Азово-Черноморского бассейна являются притоками различного порядка реки Кубань. Наиболее крупными притоками первого порядка являются реки: Теберда, Малый Зеленчук и Большой Зеленчук, Уруп, Лаба.

В настоящее время реки бассейна реки Кубань являются хорошо изученными водными объектами, однако, в виду значительной протяженности рек их верховья изучены слабо. Это связано с тем, что большинство ихтиологических исследований направлены на исследование трансформации ихтиофауны и кормовой базы, в связи со строительством гидротехнических сооружений: водохранилищ, каналов, ГЭС и т.д. или изучением сокращения популяций осетровых рыб, в виду отсутствия путей миграции.

Целью данного исследования является изучение ихтиофауны, кормовой базы и среды обитания Верхней Кубани и верхнего течения рек-притоков.

Материалы и методы исследований

Гидробиологические наблюдения велись общепринятыми методами. Идентификация видовой принадлежности рыбы проводилась по соответствующим определителям (Атлас, 2003; Берг, 1948–1949; Кузнецов, 1973; Веселов, 1977; Kottelat, Freyhof, 2007 и др.), согласно современной классификации (Решетников и др., 1997; Решетников и др., 2003; Шахмурзов и др., 2012; Kottelat, Freyhof, 2007).

Сбор водных беспозвоночных животных проводились с использованием общепринятых гидробиологических методик (Липин, 1950; Мартынов, 1952; Лепнева, 1968; Лукин, 1976; Фомин, 2000; Цалолихин, 1994–2004 и др.).

Для качественных сборов использовался гидробиологический сачок. Для количественного учета гидробионтов на каменисто-га-

лечном грунте использован бентометр Садовского (1948), наиболее хорошо зарекомендовавший себя при отборе количественных и качественных проб донных беспозвоночных (макрозообентоса) при биологическом мониторинге горных рек Кавказа и гидробиологическом анализе качества вод малых рек [5].

Определение водных беспозвоночных проведено по личиночным стадиям развития с использованием соответствующих справочных пособий (Мамаев, 1976; Кутикова, Старобогатов, 1977; Цаполихин, 1994–2004 и др.). Отловленные образцы фиксировались в 4 %-м растворе формалина и 70°-м растворе этилового спирта.

Часть проб зафиксирована 95 %-м раствором этанола в целях более тонкого таксономического анализа ряда групп водных двукрылых (Chironomidae, Simuliidae) [5].

Результаты исследований и их обсуждений

Необходимо отметить гидробиологические особенности верховьев самой реки Кубань. Исток реки Кубань принято считать от слияния рек Уллу-Кам и Учкулан. Бассейн каждой из притоков Кубани включает в себя более десятка притоков, схожих по гидрологическим характеристикам (рис. 1). Сходные гидрологические и гидробиологические характеристики сохраняются и у реки Кубань, вплоть до впадения р. Теберда, в районе г. Карачаевск.

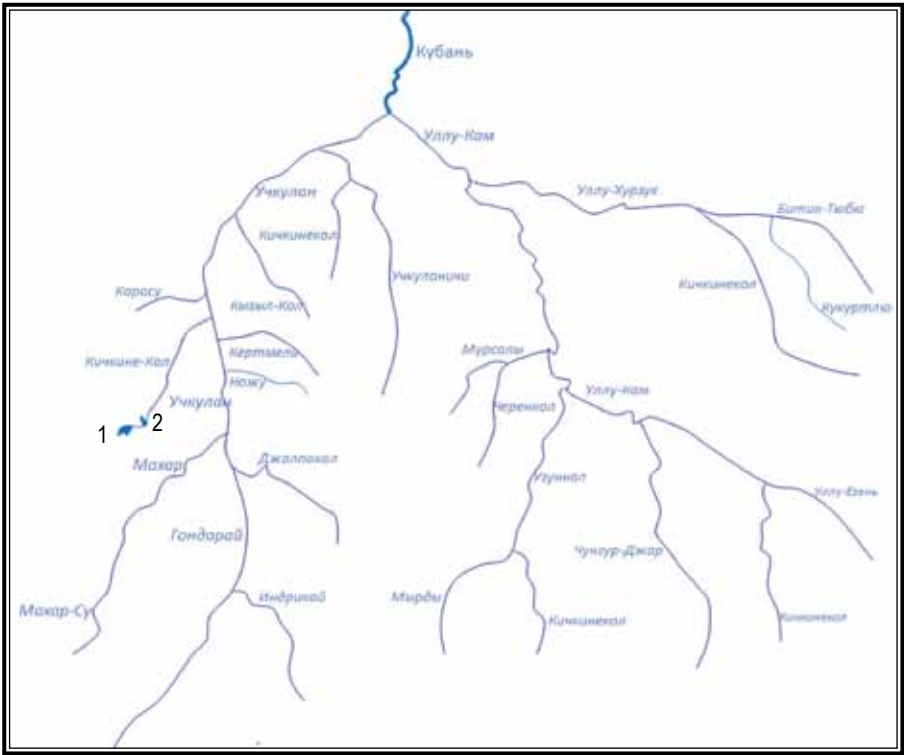
При изучении ихтиофауны, необходимо учитывать основные факторы, определяющие возможность обитания рыб в реках, к которым относятся гидролого-гидрохимический, термический режим и наличие кормовых ресурсов.

Модуль стока данных рек достаточно схож и составляет в среднем 32–37 л/сек, км² [14].

Термический режим рек также схож, в виду того, что все они имеют ледниковое питание. Среднегодовая температура рек составляет 5,7 С°.

Говоря о кормовой базе рек важно отметить, что основными кормовыми ресурсами являются: органический детрит, микроводоросли, беспозвоночные, зообентос.

Альгофлору района формируют планктонные, типично пресноводные, алкалифильные космополитные виды.



1 — озеро Уллу-Кёль
2 — озеро Киче-Кёль

Рис. 1.

Схема речной сети Верхней Кубани.
Fig. 1. Diagram of the Upper Kuban river network.
Источник: составлено авторами по данным [18].
Source: compiled by the authors according to data [18].

В систематическом плане фитопланктон рек бассейнов Уллу-Кам и Учкулан представлен преимущественно тремя основными отделами водорослей: диатомовые (Bacillariophyta), синезеленые (Cyanophyta), зеленые (Chlorophyta).

Качественные и количественные показатели фитопланктона изменяются как в количественном, так и в качественном соотношении по длине русла, что характерно для горных водотоков.

Общее разнообразие сообществ планктонной альгофлоры рек достигает 7 таксонов. Повсеместно в водотоке в рассматриваемом районе доминирует мелкая перифитонная водоросль *Epithemia turgida*. Многие виды водорослей (*Nitzschia acicularis*) ассоциированы в колонии на поверхности твердых частиц, переносимых течением, что говорит об их перифитонном происхождении.

Из диатомовых в водотоке были также обнаруживаются: *Navicula radiosa*, *N. vulpina*, *Gyrosigma* sp., *Pinnularia viridis*, *Fragilaria* sp., *Caloneis amphisbaena*, *Diatoma elongate*, *Synedra vaucheria*, *S. uina*, *Tabellaria* sp., *Eunotia robusta*, *E. arcusu*.

Сине-зеленые и зеленые представленные *Scenedesmus quadricauda*, *Closterium lunula*, *Cosmarium protuberans*, *Raphidonema* sp., *Anabaena affinis* имели ограниченное распространение и не образовывали значительных биомасс. Обилие синезеленых в водотоках возрастало к концу лета. Наиболее распространены виды родов *Microcystis* и *Anabaena*. Развитие синезеленых в реках обуславливается поступлением биогенных веществ с селитебных территорий.

Пики численности фитопланктона приходятся на апрель и сентябрь. В динамике численности фитопланктона отсутствует пик в конце лета, что обусловлено слабым развитием сине-зеленых водорослей в водотоке.

Биомасса водорослей и их численность были незначительны. Средняя биомасса не превышает 0,038 г/м³ при численности около 61,8 млн кл./м³. Фитопланктон рек исследуемого района, как и в других горных реках, весьма беден в видовом отношении. Это обуславливается низким количеством минеральных веществ в водной толще и горным характером реки, низким температурным фоном.

В период исследований в уловах планктонных сетей обнаружено 7 видов зоопланктонных организмов.

Преобладали по видовому разнообразию коловратки – 4 вида, далее следовали по числу копеподы – 2 вида. В классе коловраток доминировали *Keratella quadrata*, *Polyarthra* sp., а среди веслоногих ракообразных – циклопиды и их науплии (*Cyclops* sp.), доминирующие на протяжении всего года. Отмечены также экземпляры водяных клещей (*Hydracarina*) и личиночных стадий насекомых.

Средние значения биомассы зоопланктона за вегетационный сезон в рассматриваемых реках равны 0,099 г/м³.

Основное ядро организмов зообентоса рассматриваемого района составляют пресноводные формы, по числу видов преобладают хирономиды.

Насекомые в составе бентоса были представлены личиночными стадиями: поденок (*Ecdionurus venosus*, *Baetidae* sp., *Centochironomus*), веснянок (*Perla* sp., *Geoff*), ручейников (*Potomophylax stellatus*, *Polycentropodidae* sp.), хирономид из рода *Cryptochironomus*. Наибольшее развитие получили личинки подёнок (61,0%), ручейников (24,0%), веснянок (5,1%), стрекоз и двукрылых (6,8%). Так же в составе зообентоса рек отмечены: губки (*Spongia*) – один вид, мшанки (*Bryozoa*) – шесть видов, ресничные черви (*Turbellaria*) – три вида, нематоды (*Nematoda*) – шесть видов, водные клещи (*Hydracarina*) – шесть видов, сетчатокрылые (*Neuroptera*) – один 1 вид и вислкрылки (*Sialidae*) – один вид.

Максимальных значений биомасса бентоса достигает к концу июня – началу июля. Затем происходит снижение концентрации донных организмов, которое связано с выеданием бентоса рыбами, а также ухудшением условий жизни для некоторых групп гидробионтов в летне-осенний меженный период. Осенью, с окончанием жизненного цикла животных, масса зообентоса становится минимальной.

В среднем за вегетационный сезон биомасса бентоса составляет 1,85 г/м².

Ихтиофауна обследованных рек малочисленна по видовому составу и представлена исключительно ручьевой форелью (*Salmo trutta morphafarior*).

Тело покрыто многочисленными красными или оранжевыми, а также черными пятнами, наиболее интенсивными в верхней поло-

вине тела и спинном плавнике. Тело прогонистое, покрыто мелкой чешуей – до 132 в продольном ряду. Лучей в спинном плавнике (D) III-V 8-11, в анальном (А) – (Jl)-III 7-10. Окраска сильно варьирует и зависит от мест обитания. Длина форелей обычно 25–35 см, масса 200-500 г, очень редко до 2 кг.

Эта рыба очень требовательна к содержанию в воде кислорода, снижение этого показателя до 3,5–4 мг/л является критической величиной.

Питается воздушными насекомыми и их личинками, а также мелкой живностью всех видов. Взрослая форель хищничает, поедая головастиков и мелкую рыбу, в том числе и собственную молодь.

Ведет одиночный образ жизни, образуя скопления лишь в период нереста – осенью-зимой.

Таблица 1.

ЧИСЛЕННОСТЬ ЭКЗ/ГА SALMO TRUTTA MORPHAFARIO
НА ИССЛЕДУЕМОМ УЧАСТКЕ
Table 1. The number of copies/ha of Salmo trutta morphafario
in the study area

Месяцы												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
25	21	26	18	20	19	12	12	28	23	24	21	20,75

Источник: составлено авторами по данным [18].
Source: compiled by the authors according to data [18].

Таблица 2.

БИОМАССА КГ/ГА SALMO TRUTTA MORPHAFARIO
НА ИССЛЕДУЕМОМ УЧАСТКЕ
Table 2. Biomass kg/ha of Salmo trutta morphafario at the study site

Месяцы												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
5,2	3,8	4,2	3,6	3,7	3,5	3,0	2,8	6,4	3,8	3,8	4,0	3,98

Источник: составлено авторами по данным [18].
Source: compiled by the authors according to data [18].

Таблица 3.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ SALMO TRUTTA MORPHAFARIO
В ПЕРИОД ИССЛЕДОВАНИЙ 2022–2023 гг.
Table 3. Biological parameters of Salmo trutta morphafario in the research
period 2022–2023

Длина, см			Масса, г			Возраст, лет		
от	до	ср.	от	до	ср.	от	до	ср.
3,5	27,5	18,0	4,2	297,0	125,6	0+	3+	2+

Источник: составлено авторами по данным [18].
Source: compiled by the authors according to data [18].

Таким образом, проведенное исследование подтверждает факт того, что ихтиофауна представлена почти исключительно ручьевой форелью.

Рыбопродуктивность рек Верхней Кубани составляет 3,98 кг/га.

Ниже приведены гидробиологические параметры реки Кубань (ниже г.Карачаевск), а также рек – притоков первого порядка и рек – притоков второго порядка, включая малые реки, протекающие на низкогорной и равнинной территории республики: Дзегута, Абазинка, Жако, Нагаюко, Большой Щеплонок, балка Смертная и др.

Из таблицы 4 можно определить разницу в концентрациях кормовых организмов в виду различного гидрологического режима водотоков. Горные водотоки, имея достаточно быстрое течение и холодную воду имеют меньшие концентрации фитопланктона и зоопланктона. Следовательно, наиболее частым обитателями этих рек будут рыбы, с преимущественно бентосным питанием.

По отношению к пищевому рациону в исследуемых реках можно выделить: планктонофагов (молодь всех карповых рыб), зообентофагов (усач, пескарь), хищников, зоопланктонофагов (молодь всех карповых рыб), эврифагов (табл. 5).

По отношению к скорости течения рыбы данной акватории относятся к реофилам, т.е. рыбам, предпочитающим высокие скорости течения воды и благодаря рыбам, мигрирующим из притоков в реках выделяется группа лимнофилов (табл. 5).

По срокам нереста рыбы рек рассматриваемого района образуют две группы: весенне-летне-нерестящиеся и осенне-зимне-не-

Таблица 4. СРЕДНЕСЕЗОННЫЕ БИОМАССЫ КОРМОВЫХ ОРГАНИЗМОВ
В ПЕРИОД ИССЛЕДОВАНИЙ 2022–2023 ГГ.
Table 4. Average seasonal biomass of forage organisms in the research
period 2022–2023

Река	Среднесезонные биомассы кормовых организмов		
	Фитопланктона, г/м³	Зоопланктона, г/м³	Зообентоса, г/м²
Река Кубань (ниже г. Карачаевск)	0,08	0,005	2,55
Река Джегута	0,07	0,6	4,31
Река Абазинка	0,048	0,099	3,97
Балка Смертная	0,15	0,15	3,80
Река Аманауз	0,03	0,009	4,32
Река Гоначхир	0,03	0,009	4,50
Река Теберда	0,045	0,01	4,55
Река Муху	0,04	0,008	4,25
Река Большой Зеленчук (верхнее течение, включая истоки: Кизгыч, Псыш и Архыз до пос. Даусуз)	0,04	0,008	5,10
Река Большой Зеленчук (ниже пос. Даусуз)	0,055	0,02	5,20
Река Псыкао	0,15	0,16	4,10
Река Большой Щеплонок	0,17	0,18	4,25
Река Маруха	0,04	0,055	5,35
Река Аксаут	0,04	0,04	5,55
Река Малый Зеленчук	0,054	0,066	7,56
Балка Жако	0,12	0,14	3,90
Река Нагаюко	0,15	0,16	4,10
р.Кяфар (от истока до слияния с Кяфар-Агур)	0,03	0,007	4,45
р. Кяфар (нижнее течение)	0,05	0,012	5,60
Река Уруп (верхнее течение до слияния с р.Малый Уруп)	0,09	0,02	3,88
Река Уруп (нижнее течение – пос. Уруп)	0,19	0,22	5,40
Река Бахмутка	0,07	0,02	3,22
Река Большая Лаба (до поселка Пхия)	0,05	0,09	3,15
Река Большая Лаба (нижнее течение)	0,25	0,19	4,65

Источник: составлено авторами по данным [18].
Source: compiled by the authors according to data [18].

Таблица 5. ВИДОВОЙ СОСТАВ В ИХТИОФАУНЕ РЕК
Table 5. Species composition in the ichthyofauna of rivers

Рыбы	Реки									
	Река Кубань (ниже г. Карачаевск)	Река Джугута	Река Абазинка	Балка Смертная	Река Аманауз	Река Гоначхир	Река Теберда	Река Муху	Река Большой Зеленчук (верхнее течение, включая истоки: Кизгыч, Псыш и Архыз до пос. Даусуз)	Река Большой Зеленчук (ниже пос. Даусуз)
Семейство Лососевые – Salmonidae										
Ручьевая форель – Salmo trutta morpha fario	+	+	–	–	+	+	+	+	+	+
Семейство Карповые – Cyprinidae										
Сазан – Cyprinus carpio	–	–	+	–	–	–	–	–	–	–
Карась серебряный – Carassius auratusgibelio	+	–	+	–	–	–	–	–	–	–
Кавказский голавль – Leuciscus cephalus orirntalis	+	+	+	–	–	–	+	–	–	+
Кубанский усач – Barbus tauricus kubanicus	+	+	+	–	–	–	+	–	–	+
Кубанский подуст – Chondrastoma	+	+	+	–	–	–	+	–	–	+
Русская быстрянка – подвид кубанская – Alburnoides rossicus	+	+	+	–	–	–	+	–	–	+
Обыкновенный голяян – Proxinus proxinus	+	+	+	–	–	–	+	–	–	+
Плотва – Rutilus rutilus	+	–	+	–	–	–	–	–	–	–
Краснопёрка – Scardinus erythrophthalmus	+	–	+	–	–	–	–	–	–	–
Северо-кавказский пескарь (Gobio gobio lepidolaemus natio caucasicus)	+	+	+	–	–	–	+	–	–	+

Таблица 5. ОКОНЧАНИЕ

Рыбы	Реки									
	Река Кубань (ниже г. Карачаевск)	Река Джегута	Река Абазинка	Балка Смертная	Река Аманауз	Река Гоначхир	Река Теберда	Река Муху	Река Большой Зеленчук (верхнее течение, включая истоки: Кизгыч, Псыш и Архыз до пос. Даусуз)	Река Большой Зеленчук (ниже пос. Даусуз)
Семейство Немахейловые – Nemacheilidae										
Голец Крыницкого – Barbatula merga	+	+	+	–	–	–	+	–	–	+
Семейство Окуневые – Percidae										
Окунь речной – Perca fluviatilis	+	–	+	–	–	–	–	–	–	–
Судак – Sander lucioperca	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Ерш обыкновенный – Gymnocephalus cernuus	+	–	+	–	–	–	–	–	–	–

Источник: составлено авторами по данным [18].
Source: compiled by the authors according to data [18].

рестящиеся. Большинство видов относится к группе весенне-летне-нерестящихся (середина апреля – середина июня). Их размножение обычно начинается в апреле и завершается в июне. Осенне-зимне-нерестящиеся виды представлены только жилой формой черноморской кумжи – ручьевой форелью, для которой, как и для других лососевых, характерно размножение в холодное время года (обычно с середины октября до конца декабря) и длительное эмбриональное развитие потомства в икре в нерестовых буграх.

Несмотря на достаточно небольшое видовое разнообразие, реки Кубанского речного бассейна на территории Карачаево-Черкесской Республики относятся к рекам высшей рыбохозяйственной категории.

На экологическое состояние гидробиологических сообществ рек большое воздействие оказывает изменение гидрологического

Река Псыкао	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	+
Река Большой Щеплонок	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Река Маруха	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Река Аксаут	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Река Малый Зеленчук	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Балка Жако	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Река Нагаюко	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
р.Кяфар (от истока до слияния с Кяфар-Агур)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
р.Кяфар (нижнее течение)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Река Уруп (верхнее течение до слияния с р. Малый Уруп)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Река Уруп (нижнее течение – пос. Уруп)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Река Бахмутка	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Река Большая Лаба (до поселка Пхия)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Река Большая Лаба (нижнее течение)	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

режима, в последние годы отмечается изменение внутригодового распределения стока [7].

Заключение

Проведённое исследование рек Верхней Кубани и в целом рек Кубанского речного бассейна позволяет оценить состояние кормовой базы и видовой состав ихтиофауны, а также количественные данные животного населения. Изучение видового разнообразия географической среды несет в себе цель – контроль за состоянием и нормальным функционированием всех структурных элементов географической оболочки.

Кормовая база исследуемых рек Карачаево-Черкесии состоит из фитопланктона, зоопланктона и зообентоса. Ихтиофауна верховьев обследованных рек представлена исключительно ручьевого фо-

Таблица 6. РЫБОПРОДУКТИВНОСТЬ, РЫБОХОЗЯЙСТВЕННАЯ
КАТЕГОРИЙНОСТЬ МАЛЫХ РЕК БАССЕЙНА РЕКИ КУБАНЬ
Table 6. Fish productivity, fishery categorization of small rivers
of the Kuban River basin

Река	Рыбохозяйственная категория	Рыбопродуктивность (кг/га)
Река Кубань (ниже г. Карачаевск)	Высшая	10
Река Джегута	Высшая	9
Река Абазинка	Первая	3,5
Балка Смертная	Вторая	ихтиофауны нет
Река Аманауз	Высшая	5
Река Гоначхир	Высшая	5
Река Теберда	Высшая	5,5
Река Муху	Высшая	5
Река Большой Зеленчук (верхнее течение, включая истоки: Кизгыч, Псыш и Архыз до пос. Даусуз)	Высшая	5,5
Река Большой Зеленчук (ниже пос. Даусуз)	Высшая	7
Река Псыкао	Первая	8
Река Большой Щеплонок	Первая	8
Река Маруха	Высшая	6
Река Аксаут	Высшая	6
Река Малый Зеленчук	Высшая	7
Балка Жако	Первая	8
Река Нагаюко	Первая	8
р. Кяфар (от истока до слияния с Кяфар-Агур)	Высшая	5,5
р. Кяфар (нижнее течение)	Высшая	5
Река Уруп (верхнее течение до слияния с р. Малый Уруп)	Высшая	5
Река Уруп (нижнее течение – пос. Уруп)	Высшая	5,5
Река Бахмутка	Высшая	5
Река Большая Лаба (до поселка Пхия)	Высшая	5,5
Река Большая Лаба (нижнее течение)	Высшая	6,5

Источник: составлено авторами по данным [18].

Source: compiled by the authors according to data [18].

релью (*Salmo trutta morphafario*). В нижних течениях видовой состав ихтиофауны становится более разнообразным. Отличительными чертами обладают низкорослые и равнинные, в виду своего гидрологического и температурного режимов, а также содержания кислорода в данных реках не встречается ручьевая форель.

Полученные в ходе исследования данные могут быть использованы для научных исследований, применены при расчетах оценки воздействия на водные объекты от хозяйственной деятельности и в разработке других природоохранных мероприятий.

Список источников

1. Атлас пресноводных рыб России. Т. 1–2. М.: Наука, 2003. Т. 1. 379 с. Т. 2. 253 с.
2. Берг Л. С. Рыбы пресных вод СССР и сопредельных стран. М.-Л.: Изд-во АН СССР, Ч. 1, 1948. 469 с.
3. Веселов Е. А. Определитель пресноводных рыб фауны СССР. М.: Просвещение, 1977. 238 с.
4. Гвоздецкий Н. А. Физическая география Кавказа. Ч. 1. М.: 1954. 212 с.
5. Горидченко Т. П. Временные методические указания по осуществлению отбора гидробиологических проб на малых реках. М., 1994. 270 с.
6. Кузнецов Б. А. Определитель позвоночных животных фауны СССР. Ч. 1. Рыбы, земноводные, пресмыкающиеся. М.: Просвещение, 1974. 204 с.
7. Кучменова И. И. Гидролого-гидрохимический режим основных рек Кабардино-Балкарского высокогорного государственного заповедника в условиях современного изменения климата // Наука. Инновации. Технологии. 2024. № 4. С. 45–60.
8. Определитель пресноводных водорослей СССР / Под ред. М. М. Голлербах. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1951–1986. Т. 1–14.
9. Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР (планктон и бентос) / Отв. ред. Л. А. Кутикова, Я. И. Старобогатов. Л.: Гидрометеиздат. 1977. 511 с.
10. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 1. Низшие беспозвоночные / Под ред С. Я. Цалолихин: Губки, Книдарии, Турбеллярии,

Коловратки, Гастротрихи, Нематоды, Волосатики, Олигохеты, Пиявки, Мшанки, Тихоходки. С.-Пб.: ЗИН, 1994. 396 с.

11. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 2. Ракообразные / Под ред. В.Р. Алексеев: Листоногие, Ветвистоусые, Веслоногие, Остракоды, Кумовые, Мизиды, Изоподы, Декаподы, Амфиподы. С.-Пб.: ЗИН, 1995. 628 с.
12. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 5. Высшие насекомые / Под ред. Э.П. Нарчук: Ручейники, Бабочки, Жуки, Сетчатокрылые. С.-Пб.: ЗИН, 2001. 836 с.
13. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 6. Моллюски, Полихеты, Немертины / Под ред. В. В. Богатов, С. Я. Цалолихин): Двустворчатые, Брюхоногие, Полихеты, Немертины. 2004. 527 с.
14. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т.8. Северный Кавказ / Под ред. Д. Д. Мордухай-Болтовского. Л.: Гидрометеиздат, 1964. 309 с.
15. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений / Под ред. В. А. Абакумова. Л.: Гидрометеиздат. 1983. 239 с.
16. Правдин И. Ф. Руководство по изучению рыб (преимущественно пресноводных). М.: Пищевая промышленность. 1966. 376 с.
17. Kottelat M., Freyhof J. Handbook of European freshwater fishes. Berlin, 2007. 646 p.
18. Фондовые данные Северо-Кавказского филиала ФГБУ «Главрыбвод».

References

1. Atlas of freshwater fishes of Russia. Vol.1-2. Moscow: Nauka; 2003. Vol. 1. 379 p. Vol. 2. 253 p.
2. Berg LS. Freshwater fishes of the USSR and neighboring countries. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; Part 1, 1948. 469 p.
3. Veselov EA. Determinant of freshwater fishes of the fauna of the USSR. Moscow: Prosveshchenie; 1977. 238 p
4. Gvozdetsky NA. Physical geography of the Caucasus. Part 1. Moscow; 1954. 212 p.

5. Goridchenko TP. Temporary methodological guidelines for the selection of hydrobiological samples on small rivers. Moscow; 1994. 270 p.
6. Kuznetsov BA. Determinant of vertebrate animals of the fauna of the USSR. Part 1. Fish, amphibians, reptiles. Moscow: Prosveshchenie; 1974. 204 p.
7. Kuchmenova II. The hydrological and hydrochemical regime of the main rivers of the Kabardino-Balkarian high-altitude state Reserve in the context of modern climate change. Science. Innovations. Technologies. 2024;(4):45-60.
8. Determinant of freshwater algae of the USSR. Ed. by MM Gollerbach. M.-L.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1951–1986. Vol. 1–14.
9. Determinant of freshwater invertebrates of the European part of the USSR (plankton and benthos). Ed. by LA Kutikova, Yal Starobogatov. L.: Hydrometeoizdat; 1977. 511 p.
10. Determinant of freshwater invertebrates of Russia and adjacent territories. Volume 1. Lower invertebrates. Ed. by SYa Tsalolikhin: Sponges, Cnidarians, Turbellariae, Rotifers, Gastrotrichs, Nematodes, Hairworms, Oligochaetes, Leeches, Bryozoans, Tardigrades. St. Petersburg: ZIN; 1994. 396 p.
11. Determinant of freshwater invertebrates of Russia and adjacent territories. Volume 2. Crustaceans. Ed. by VR Alekseev: Decapods, Branchopods, Copepods, Ostracods, Cumaceans, Mysids, Isopods, Decapods, Amphipods. S.-Pb.: ZIN; 1995. 628 p.
12. Determinant of freshwater invertebrates of Russia and adjacent territories. Volume 5. Higher insects. Ed. by EP Narchuk: Brooks, Butterflies, Beetles, Networms. St. Petersburg: ZIN; 2001. 836 p.
13. Determinant of freshwater invertebrates of Russia and adjacent territories. Volume 6. Mollusks, Polychaetes, Nemertines. Ed. by VV Bogatov, SYa Tsalolikhin: Bivalves, Gastropods, Polychaetes, Nemertines. 2004. 527 p.
14. Surface water resources of the USSR: Hydrological studies. Vol. 8. North Caucasus. Ed. by DD Mordukhai-Boltovsky. L.: Gidrometeoizdat; 1964. 309 p.
15. Manual on methods of hydrobiological analysis of surface waters and bottom sediments. Ed. by VA Abakumov. L.: Hydrometeoizdat; 1983. 239 p.
16. Pravdin IF. Guidelines for the study of fish (mainly freshwater). Moscow: Food industry; 1966. 376 p.

17. Kottelat M, Freyhof J. Handbook of European freshwater fishes. Berlin; 2007. 646 p.
18. Stock data of the North Caucasus branch of the Federal State Budgetary Institution Glavrybvod.

Информация об авторах

Асланбек Заурбекович Керефов – заместитель руководителя – начальник Северо-Кавказского филиала ФГБУ «Главрыбвод», Researcher ID: MGT-8251-2025.

Юрий Петрович Костин – начальник отдела по рыболовству и сохранению водных биологических ресурсов по Ставропольскому краю и Карачаево-Черкесской Республике Северо-Кавказского филиала ФГБУ «Главрыбвод», Researcher ID: MGT-8265-2025.

Роман Сергеевич Губанов – заместитель начальника отдела по рыболовству и сохранению водных биологических ресурсов по Ставропольскому краю и Карачаево-Черкесской Республике Северо-Кавказского филиала ФГБУ «Главрыбвод», Scopus ID: 58532005800 Researcher ID: MGT-8222-2025.

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

Information about the authors

Aslanbek Z. Kerefov – Deputy Head – Head of the North Caucasus Branch, Federal State Budgetary Institution Glavrybvod, Researcher ID: MGT-8251-2025.

Yuri P. Kostin – Head of the Department for Fisheries and Conservation of Aquatic Biological Resources in the Stavropol Krai and the Karachay-Cherkess Republic of the North Caucasus Branch, Federal State Budgetary Institution Glavrybvod, Researcher ID: MGT-8265-2025.

Roman S. Gubanov – Deputy Head of the Department for Fisheries and Conservation of Aquatic Biological Resources in the Stavropol Krai and the Karachay-Cherkess Republic of the North Caucasus Branch, Federal State Budgetary Institution Glavrybvod, Scopus ID: 58532005800 Researcher ID: MGT-8222-2025.

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



Научная статья

УДК 910.1

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.4>

ЭТНОДЕМОГРАФИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ РАЗВИТИЯ ТЕРРОРИСТИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В СУДАНО-САХЕЛЬСКОМ РЕГИОНЕ

Илья Павлович Супрунчук^{1*},
Галина Николаевна Жиренко²,
Анна Анатольевна Савченко³

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

¹ ilia_suprunchuk@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5106-187X>

² gzhirenko@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0001-5115-4726>

³ a.savchenko200383@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-7461-5365>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Статья посвящена исследованию стран Судано-Сахельского региона и процессов развития терроризма на его территории. На страновом уровне предпринимается попытка изучения террористической деятельности и факторов, которые ее обуславливают. Временными рамками исследования является весь период независимого существования стран региона, берущий свое начало еще в начале 1960-х гг. Определен ряд социально-политических проблем и противоречий, формирующих современную политическую нестабильность и геостратегическую значимость Судано-Сахельского региона. В работе подробно рассматривается влияние группы этнодемографических факторов на террористическую деятельность. Главными их аспектами выделены динамика и тип воспроизводства населения, структура и особенности систем расселения, этнический состав населения и его мозаичность. В дополнении к этому, анализировался генезис и развитие социально-политических конфликтов в странах сахельского региона, определенные этими факторам. В статье на основе собранных статистических данных, представленных количеством террористических актов и их жертв, о террористической деятельности в странах Судано-Сахельского региона исследуется динамика терроризма в регионе – выделены периоды его развития, определены произошедшие пространственно-временные сдвиги и изменения. Определено современное место региона в общемировых тенденциях развития терроризма, выявлены ведущие страны, тер-

террористические организации и очаги конфликтов, влияющие на терроризм в Сахеле. В рамках изучения региональных особенностей террористической деятельности, с помощью картографического метода и инструментов пространственно-временного анализа, были выделены конкретные территориальные центры терроризма, а также состоящие из них террористические кластеры – Чадский, Центральный, Восточный, Прибрежный, Туарегский, Дарфурский и Южно-Суданский.

Ключевые слова: террористическая деятельность, терроризм, Африка, Судано-Сахельский регион, этно-демографические факторы, национальная безопасность, политические конфликты

Для цитирования: Супрунчук И. П., Жиренко Г. Н., Савченко А. А. Этнодемографические факторы развития террористической деятельности в Судано-Сахельском регионе // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 2. С. 81–112. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.4>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 20.01.2025;
одобрена после рецензирования 25.04.2025;
принята к публикации 19.06.2025.

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

**Ethnodemographic factors of terrorist activity
development in the Sudan-Sahel region**

**Ilya P. Suprunchuk^{1*},
Galina N. Zhirenko²,
Anna A. Savchenko³**

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

¹ ilia_suprunchuk@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-5106-187X>

² gzhirenko@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0001-5115-4726>

³ a.savchenko200383@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0007-7461-5365>

* Corresponding author

Abstract.

The article studies the countries of the Sudan-Sahel region and the processes of terrorism development on its territory. At the country level, an attempt is being made to study terrorist activity and the factors that cause it. The time frame of the study is the entire period of the independent existence of the countries of the region, dating back to the early 1960s. A number of socio-political problems and contradictions that form the current political instability and geostrategic significance of the Sudan-Sahel region have been identified. The paper examines in detail the influence of a group of ethnodemographic factors on terrorist activity. Their main aspects are the dynamics and type of reproduction of the population, the structure and features of settlement systems, the ethnic composition of the population and its mosaic. In addition, the genesis and development of socio-political conflicts in the countries of the Sahel region, determined by these factors, were analyzed. Based on the collected statistical data provided by the number of terrorist acts and their victims on terrorist activities in the countries of the Sudan-Sahel region, the article examines the dynamics of terrorism in the region, highlights the periods of its development, identifies the spatial and temporal shifts and changes that have occurred. The current place of the region in the global trends in the development of terrorism is determined, the leading countries, terrorist organizations and hotbeds of conflict affecting terrorism in the Sahel are identified. As part of the study of regional features of terrorist activity, using the cartographic method and spatial and temporal analysis tools, specific territorial centers of terrorism were identified, as well as terrorist clusters – Chad, Central, Eastern, Coastal, Tuareg, Darfur and South Sudan.

Keywords:

terrorist activity, terrorism, Africa, Sudan-Sahel region, ethnodemographic factors, national security, political conflicts

For citation:

Suprunchuk IP, Zhirenko GN, Savchenko AA. Ethnodemographic factors of terrorist activity development in the Sudan-Sahel region. Science. Innovations. Technologies. 2025;(2):81-112. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.4>

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

The article was submitted 20.01.2025;
approved after reviewing 25.04.2025;
accepted for publication 19.06.2025.

Введение

На современной политической карте мира можно отметить большое количество конфликтных регионов, зон интересов различных стран, «горячих точек» вооруженных конфликтов. Представляется особенно важным выделение наиболее кризисных конфликтогенных территорий мира и изучение факторов, формирующих в них политическую нестабильность. К перечню таких критических регионов мира относится Судано-Сахельский регион. Для этого региона характерны низкий уровень экономического развития, слабость политических институтов, полиэтнический состав населения и продолжающийся демографический взрыв.

С начала XXI века наблюдается активизация террористической деятельности, во многих странах происходит внутренний социально-политический кризис. Необходимо иметь в виду значимость этих огромных территорий как транзитной зоны, в том числе миграционной, для всей Африки большой природно-ресурсный и демографический потенциал, а также серьезные риски для безопасности соседних регионов в случае обострения различных конфликтов в Сахеле.

В современном мире сложно найти более «пёстрый» регион, с этнической чересполосицей в связке с острой геополитической ситуацией. Исходя из этого, в данной работе предпринимается попытка выделения этно-демографического фактора развития терроризма. Для этого потребовалось решить ряд последовательных задач. Во-первых, определить круг статистических показателей, отражающих развитие террористической деятельности и этно-демографические аспекты развития стран. Во-вторых, выявить и исследовать взаимосвязи между демографическим развитием и политической нестабильностью сахельских стран. В-третьих, на основе выделенных взаимосвязей провести дифференциацию стран Судано-Сахельского региона.

Материалы и методы исследований

Для данного исследования необходимостью выступает формулирование его территориальных рамок. Существует несколько различных подходов к определению границ изучаемого региона. В широком общегеографическом смысле Сахель представля-

ет собой переходную природную зону, характерную только для Африки, между пустыней Сахара на севере и саваннами на юге. Данную природную зону чаще всего ограничивают изогией в 400 мм осадков в год, при этом основным видом хозяйственной деятельности выступает кочевое животноводство [1]. Ввиду ее территориальной протяженности с запада на восток через весь континент (рис. 1) и характера экономического освоения, в последнее время для нее часто используют понятие «Судано-Сахельский коридор». В представленной работе с учетом общности многих социально-политических процессов и многоаспектной специфики отдельных стран под Судано-Сахельским регионом предлагается понимать совокупность 11 африканских государств, таких как Сенегал, Мавритания, Мали, Нигер, Буркина-Фасо, Нигерия, Камерун, Чад, Судан, Южный Судан и Эритрея.

Странам, отдельным частям и территориям Судано-Сахельского региона посвящены многочисленные геополитические исследования. Так, актуальной для стран региона проблемой является принадлежность и экономическое использование богатых природных ресурсов – урана в Мали и Нигере [2], нефти в дельте реки Нигер [3] и в пограничных спорных районах Судана и Южного Судана [4]. При этом главным ресурсом для большинства местного населения выступают пастбищные угодья. Многие внутренние политические конфликты имеют исторические корни в противостояниях между скотоводческими племенами и земледельцами, а с учетом неблагоприятных климатических изменений могут только обостриться.

Важное место исследуемый регион занимает и в конфессиональном пространстве африканского континента. Для получивших независимость только во второй половине XX века африканских государств возникла проблема поиска идентичности, одной из главных основ которой стала религия. За последние 100 лет конфессиональная структура населения Африки кардинально преобразовалась. Если в начале XX века ведущее место на континенте занимали этнорелигии, второй религией был ислам, третьей – христианство, то к XXI веку лидером по числу верующих стало христианство протестантского направления, немного уступает ему ислам, а этнорелигии значительно сократили свою долю и стали третьими [5].

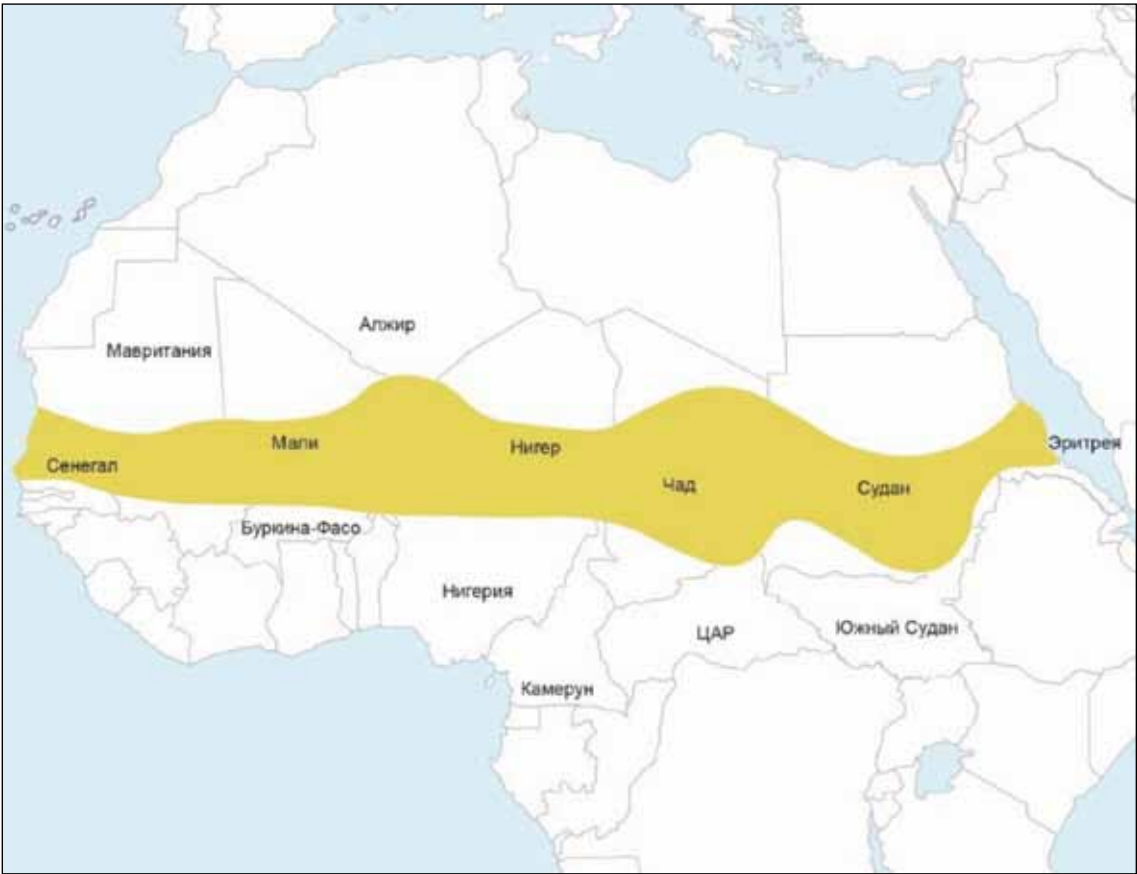


Рис. 1. Природная зона Сахель и страны Судано-Сахельского региона.
Fig. 1. The Sahel natural area and the countries of the Sudan-Sahel region.

В ходе этого масштабного «религиозного передела» между отдельными религиозными направлениями происходила серьезная конкурентная борьба за население африканских стран. При этом масштабные религиозные конфликты сформировались в странах Судано-Сахельского коридора, которые до сих пор претерпевают трансформацию конфессионального пространства и выступают условных рубежом между исламом и христианством на континенте [6]. Особенно ярко выраженный этно-религиозный конфликт с применением террористических методов и большим числом жертв наблюдается на северо-востоке Нигерии [7].

Важным для данного исследования выступает вопрос оценки геополитического положения и внутренней политической ситуации стран Судано-Сахельского региона. Наиболее качественным для такой характеристики выступает геополитический концепт «пояс переворотов». Под ним понимаются страны Африки с наибольшей частотой попыток государственных переворотов. На текущий момент этот пояс собирает в единый регион все сахельские страны лучше, чем любые физико-географические, этнические или социально-экономические критерии. Исключение составляют только Сенегал, Эритрея и Южный Судан, хотя о двух последних говорить сложно, так как эти относительно молодые государства сами появились в результате гражданских войн в Эфиопии и Судане соответственно. Лидерами по числу переворотов в Сахеле выступают Судан, Нигерия, Нигер, Мавритания и Буркина-Фасо. Только за последние 3 года в регионе произошло шесть государственных переворотов.

Такая ситуация объясняется некоторыми авторами отсутствием социальной справедливости, слабыми институтами, безработицей и бедностью» [8]. Другие отмечают, что политическая нестабильность стала следствием колониализма, в рамках которого борьба местного населения за независимость приобрела вооруженный характер, а в последующем силовой метод решения внутренних проблем стал самым быстрым и доступным [9]. В результате слабость сахельских государств и их политическая неэффективность создали в регионе крупные очаги неуправляемых территорий [10]. Они часто становились базами для различных повстанческих и сепаратистских движений. Однако в начале XXI века на этих территориях начинают форми-

роваться местные террористические организации [11] и даже проникает международная террористическая сеть [12].

Под терроризмом в исследовании понимается социальное явление, которое основано на использовании насилия с целью нарастания атмосферы страха в обществе [13]. Данное явление реализуется через комплекс различных действий, главным из которых является террористический акт, эти действия в целом можно объединить в понятие «террористическая деятельность» [14]. По мнению авторов, высокий уровень террористической активности, как правило, свидетельствует о большом числе внутренних конфликтов и нерешенных противоречий в стране. Для формирования базы террористических данных использовалась статистика за период с 1970 по 2023 год, предоставляемая ведущими мировыми исследовательскими центрами политического и вооруженного насилия – National Consortium for the Study of Terrorism and Responses to Terrorism [15], Uppsala Conflict Data Program [16] и Armed Conflict Location & Event Data [17]. Среди этно-демографических показателей за тот же временной период анализировались динамика численности населения, суммарный коэффициент рождаемости, доля городского населения, коэффициент демографической нагрузки, ожидаемая продолжительности жизни и индекс этнической мозаичности. Следует отметить, что выбор индикаторов был обусловлен в том числе наличием и доступностью статистических данных о сахельских странах в международных организациях – Справочном бюро по народонаселению ООН [18] и Всемирном банке [19]. Для выделения и изучения взаимосвязей были применены такие статистические и математические методы как ранжирование и группировка, корреляционный анализ, многофакторный анализ.

Результаты исследований и их обсуждение

Численность населения Судано-Сахельского региона на 2023 г. составляет 438 млн человек, что делает его крупнейшим регионом Африки по населению. В его составе находится главная «демографическая супердержава» континента – Нигерия, численность населения которой приближается к 230 млн человек. Второй по численности населения страной является Судан (50 млн человек). Большинство остальных сахельских стран имеют значитель-

ную по общемировым меркам численность порядка 20–25 млн человек. Самыми малонаселенным странами Сахеля выступают Южный Судан (13 млн человек), Мавритания (5 млн человек) и Эритрея (4 млн человек).

Демографическая ситуация в Судано-Сахельском регионе в последние 60 лет характеризуется понятием «демографический взрыв», при котором в процессе воспроизводства населения снижение смертности происходит быстрее снижения рождаемости, что приводит к ускоренному увеличению численности населения. Как видно, население региона с 1960 г. увеличилось в более чем 5 раз, а население отдельных стран (Нигер, Чад и Судан) даже в 6–7 раз (табл. 1). Среднегодовой темп прироста во всех странах за изучаемое

Таблица 1. ЧИСЛЕННОСТЬ И ТЕМПЫ РОСТА НАСЕЛЕНИЯ СТРАН СУДАНО-САХЕЛЬСКОГО РЕГИОНА В 1960–2023 ГГ.
Table 1. Population size and growth rates of the countries of the Sudan-Sahel region in 1960–2023

Страна	Численность населения, млн чел (1960)	Численность населения, млн чел (2023)	Рост, % (2023/1960)	Средний годовой темп прироста, %
Сенегал	3,29	18,07	563,74	2,78
Мавритания	0,85	4,86	571,50	2,81
Мали	5,26	23,76	451,56	2,43
Нигер	3,38	26,20	773,14	3,30
Буркина-Фасо	4,82	23,02	476,79	2,51
Нигерия	45,13	227,88	504,85	2,60
Камерун	5,17	28,37	548,06	2,74
Чад	3,00	19,30	642,98	3,00
Судан	7,54	50,043	663,30	3,05
Южный Судан	2,95	13,05	441,89	2,42
Эритрея	1,00	3,75	372,80	2,12
Регион в целом	82,36	438,34	532,21	2,69

Источник: по данным [16].
Source: according to data [16].

время составил 2–3%, и на данный момент Сахель в относительных показателях является лидирующим регионом в мире по росту численности населения.

Страны Сахеля оказались в «демографическом взрыве» позднее почти всех стран мира, общий пик пришелся на 1970–1990-е гг., а ошутимое снижение рождаемости стало фиксироваться только с 2000-х гг. (рис. 2). Оставаясь на сегодняшний день мировыми лидерами по суммарному коэффициенту рождаемости (СКР), страны региона заметно отличаются особенностями своей демографической динамики. Так, для Эритреи, Судана, Камеруна, Мавритании, Сенегала и Южного Судана можно говорить о прохождении пика демографического взрыва и постепенном снижении показателей рождаемости и темпов роста населения. Также в последние десятилетия снижается СКР в Нигерии, Буркина-Фасо, Чаде и Мали, хотя в них он до сих пор не опустился ниже уровня в 5 детей на женщину. При сохранении таких темпов снижения естественного прироста численность населения этих стран продолжит расти на протяжении всего XXI века.

В данном контексте важными для демографической оценки стран выступают показатели ожидаемой продолжительности жизни и демографической нагрузки (рис. 3). Рост средней ожидаемой продолжительности жизни (ОПЖ) наблюдался во всех странах Сахеля (рис. 3Б). С 1960 г. она увеличилась в 2 раза, перешагнув в таких странах, как Сенегал, Эритрея и Судан, отметку в 65 лет. Показатель ОПЖ в каждой стране можно рассматривать как отображение уровня здравоохранения, но не стоит забывать, что его снижение часто обосновано большим количеством смертей в молодом и среднем возрасте в ходе военных конфликтов и террористической деятельности.

Наконец, коэффициент демографической нагрузки позволяет качественно изучить возрастную структуру населения исследуемых стран (рис. 4А). Очевидно, что рекордный уровень рождаемости в совокупности с невысоким средним показателем ОПЖ определяют «молодость» населения сахельских стран. Так, следуя доступной международной статистики, средний возраст населения всех стран кроме Мавритании ниже 20 лет, а Нигер является самой молодой

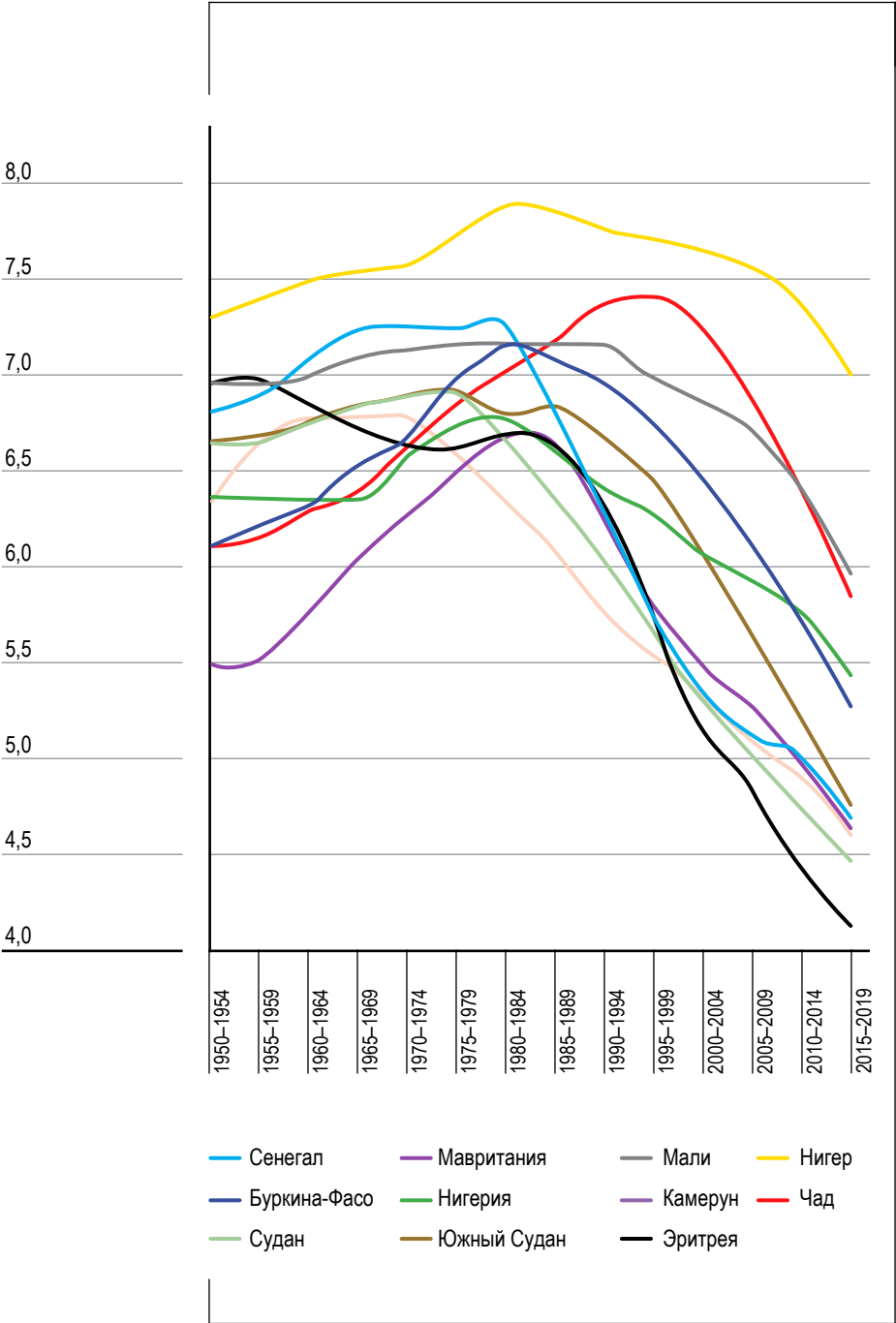


Рис. 2. Суммарный коэффициент рождаемости (СКР) стран Судано-Сахельского региона в 1950–2020 гг.
Fig. 2. The total fertility rate of the countries of the Sudan-Sahel region in 1950–2020.

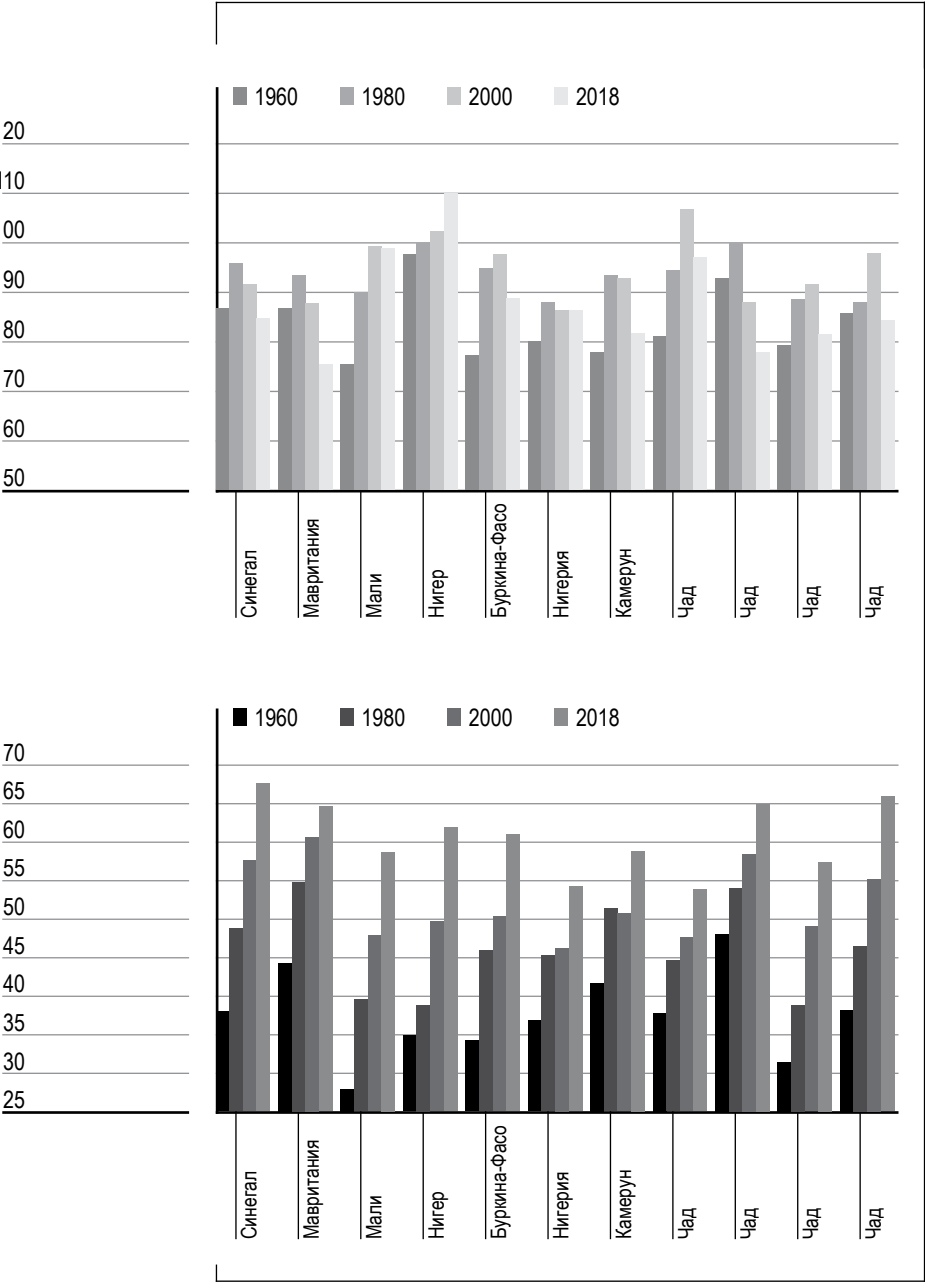


Рис. 3. Козэффициент демографической нагрузки (А) и ожидаемая продолжительность жизни (Б) в странах Судано-Сахельского региона в 1960–2019 гг.
Fig. 3. Demographic load factor (A) and life expectancy (B) in the countries of the Sudan-Sahel region in 1960–2019.
Источник: [19].
Source: [19].

страной мира со средним возрастом 14–15 лет [18]. В результате возрастает демографическая нагрузка на трудоспособное население в основном за счет большой массы молодежи. Сегодня максимальный уровень демографической нагрузки фиксируется в Нигере – 110 нетрудоспособных по возрасту на 100 трудоспособных граждан. Незначительно уступают по этому показателю Мали, а Чад и Судан в аналогичной ситуации находились в предыдущие периоды.

С теоретической точки зрения, коэффициент демографической нагрузки для всех стран Судано-Сахельского региона можно характеризовать позитивно, так как в ближайшем будущем в трудоспособном возрасте окажутся огромные по численности поколения. Сахельские страны получают возможность реализовать свой демографический дивиденд как потенциал экономического роста в условиях превышения доли трудоспособного населения в стране доли иждивенцев. В реальности страны Сахеля явно отличаются по социально-экономическому устройству от реализовавших свой дивиденд во второй половине XX века азиатских стран [20]. В данном случае актуальнее говорить о большой демографической угрозе для региона, заключающейся в невозможности трудоустройства и достойной социализации взрослеющего сейчас молодого поколения в условиях неразвитой экономики и низкой политической стабильности.

Рассмотрев особенности демографического развития стран Судано-Сахельского региона как базовые, необходимо изучить вопросы расселения в регионе, которые также могут влиять на социально-политическую стабильность. Так, одним из факторов, определяющих течение социальных и политических процессов, является урбанизация. Чаще всего именно города фокусируют экономическое и культурное развитие, становятся «точками кипения» разнообразных противоречий и конфликтов в обществе. Судано-Сахельский регион в целом является слабо урбанизированной территорией. К 2020 г. доля городского населения в нем составляет лишь 44 % (табл. 2). Характерной чертой выступает и низкая доля жителей крупных городов (более 250 тыс. человек) в населении региона – менее 19 %. Крайне мало для региона с населением более 430 млн человек крупных городских населенных пунктов: 72 города, из которых только 23 являются городами-миллионерами. На страновом уровне можно говорить о большой диспропорции в развитии городов.

Таблица 2. УРОВЕНЬ УРБАНИЗАЦИИ СТРАН СУДАНО-САХЕЛЬСКОГО РЕГИОНА В 2020 Г.
Table 2. The level of urbanization of the countries of the Sudan-Sahel region in 2020

Страна	Доля городского населения, %	Доля крупногородского (250+ тыс. чел.) населения, %	Количество крупных городов (250+ тыс. чел.) / из них миллионеров
Сенегал	48,1	32,2	7 / 2
Мавритания	55,3	29,3	1 / 1
Мали	43,9	20,0	2 / 1
Нигер	16,6	6,6	3 / 1
Буркина-Фасо	30,6	14,2	2 / 1
Нигерия	51,9	19,8	36 / 11
Камерун	57,5	33,4	7 / 2
Чад	23,5	10,2	1 / 1
Судан	35,2	15,1	9 / 3
Южный Судан	20,1	8,5	3 / 0
Эритрея	41,3	16,5	1 / 0
Регион в целом	44,3	18,8	72 / 23

Источник: по данным [19].
Source: according to data [19].

Принимая в расчет общий низкий уровень урбанизации и специфику экономического уклада стран, можно выделить два урбанистических очага в регионе – западный (Сенегал и Мавритания) и центральный (Нигерия и Камерун). Все перечисленные страны, за исключением Сенегала, совершили урбанизационный переход, в совокупности концентрируют на своей территории 2/3 всех крупных городов Сахеля, часть из которых образуют городские агломерации. Главной географической особенностью городской сети Судано-Сахельского региона выступает неосвоенность огромных территорий. Крупные города отсутствуют на севере Мали, Мавритании и Нигера, между столицами Чада и Судана нет крупных городов на протяжении более 2000 км. Такой характер городского расселения в регионе имеет под собой не только чисто демографические

и экономические причины, сильными факторами выступают природные и исторические условия. Выделенная специфика городского развития в странах Сахеля будет отражаться и на политических процессах.

Одним из факторов политической нестабильности во всех странах и регионах мира является сложный этнический состав населения. Для Африки в целом, с ее колониальным прошлым, искусственностью границ, демографическим взрывом и слабыми политическими институтами этнический фактор крайне важен. Судано-Сахельский регион не составляет в данном случае исключения, на его территории происходили и происходят этнические конфликты разной интенсивности и масштаба. При взгляде на этническую карту региона (рис. 4) становится очевидна мозаичность и чересполосное расселение народов.

Не вдаваясь в этническую историю Судано-Сахельского региона, осложненную недостаточной статистической базой, выделим главные этногеографические особенности территории. Во-первых, в регионе проживают народы, относящиеся к трем этнолингвистическим семьям – нигеро-кордофанской, нило-сахарской и афразийской. Сильно упрощая, можно сказать, что крупнейшая по численности семья – нигеро-кордофанская преимущественно расселена в западной части Сахеля, нило-сахарская – в восточной и центральных частях, афразийская – в северной части. При этом на страновом уровне этническая структура населения выглядит довольно сложной.

Эту сложность во многом сформировали историко-экономические условия. Являясь исторически зоной преимущественно кочевого скотоводства и транзитной торговли между Северной Африкой и Средиземноморьем, с одной стороны, Тропической Африкой и Ближним Востоком – с другой, Судано-Сахельский регион характеризовался бурными этническими процессами. Еще в доколониальный период образовались многие географические черты расселения народов – дисперсное очаговое расселение кочевых народов, арабское проникновение в страны, граничащие с Северной Африкой, стягивание земледельческих народов к речным долинам. Колониальная эпоха также значительно повлияла на этническую карту региона. С одной стороны, закрепила отдельные территории за конкретными народами, с другой стороны – создала и не решила ныне

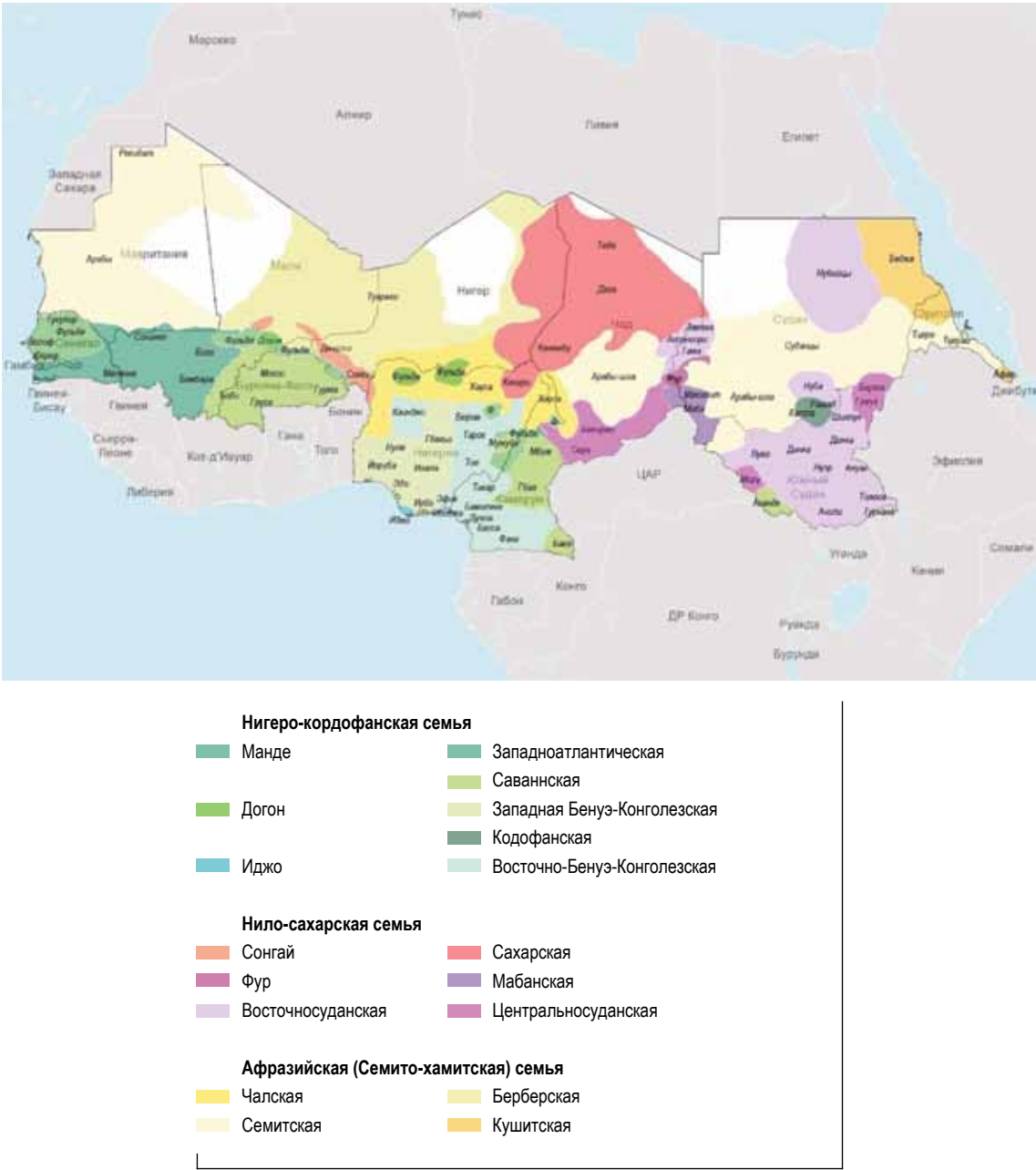


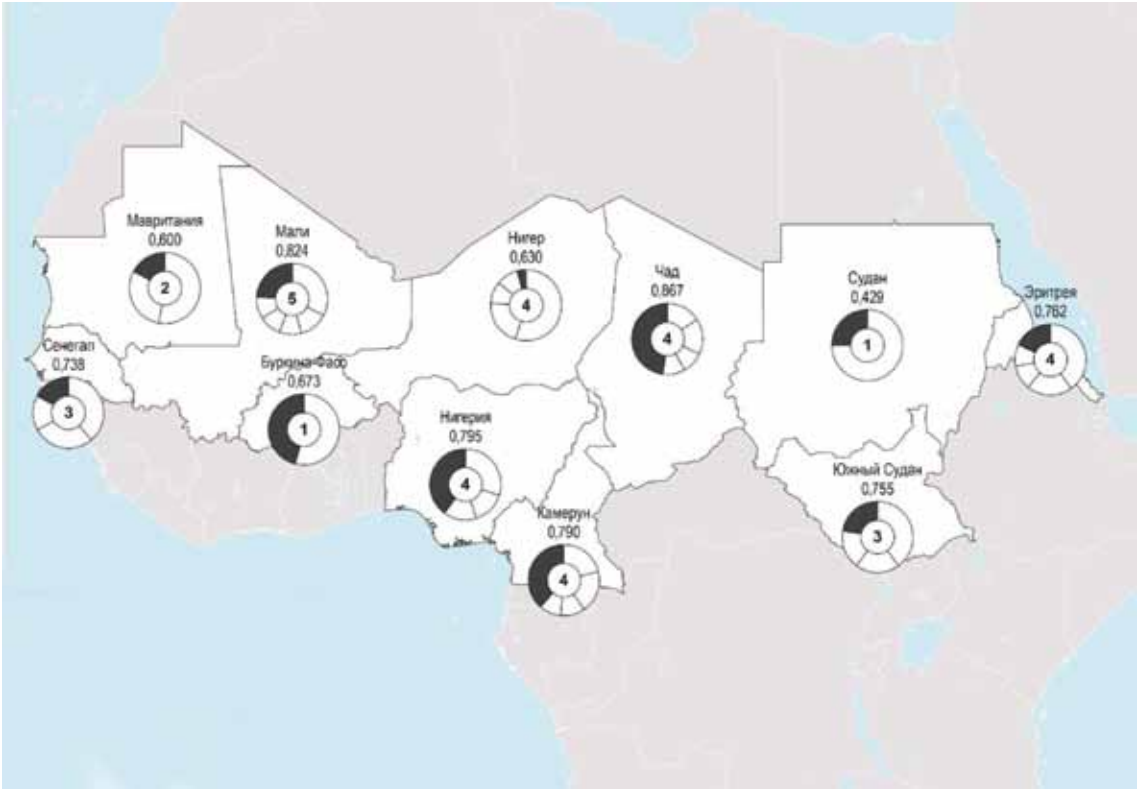
Рис. 4. Расселение основных этнических групп и этносов в странах Судано-Сахельского региона.
Fig. 4. The communities of main ethnic groups in the countries of the Sudan-Sahel region.

актуальные этнические противоречия, к примеру, проблему туарегской независимости [21].

Для качественной оценки этнической структуры стран Судано-Сахельского региона был рассчитан индекс этнической мозаичности (ИЭМ) (рис. 5). В соответствии с классификацией этноконтактных зон А.Г. Манакова по величине индекса выделяются: наиболее полиэтничные (более 0,6), ярко выраженные (от 0,4 до 0,6) и неярко выраженные (менее 0,4) [20]. Все страны Сахеля, за исключением Судана и Мавритании, являются наиболее полиэтничными. Среди них выделяется два лидера – Мали и Чад, в этнической структуре которых помимо 4–5 основных народов имеются и многочисленные национальные меньшинства. За ними по величине ИЭМ расположились Нигерия и Камерун, отличающиеся только повышенной долей первого по численности народа в стране.

Такой высокий уровень полиэтничности неоднократно выражался в виде открытых военных конфликтах с этнической компонентой – гражданские войны в Чаде, туарегский сепаратизм в Мали, попытки этнического сепаратизма в Нигерии (Биафра, Огониланд, Арева), непризнанное государство Амбазония в Камеруне. Однако в сахельском регионе можно найти примеры стран с сопоставимой полиэтничностью с разной политической судьбой. Три страны – Сенегал, Южный Судан и Эритрея имеют почти равные показатели ИЭМ, а в этнической структуре основные народы представляют одну этнолингвистическую семью: нигеро-кордофанскую в Сенегале, нило-сахарскую в Южном Судане и афразийскую в Эритрее. При этом Сенегал и Эритрея – острова политической стабильности в регионе, с минимальным уровнем терроризма и отсутствием внутренних вооруженных противостояний. Южный Судан, напротив, после получения независимости от Судана в 2011 году почти сразу оказалась в ситуации гражданской войны между крупнейшими этносами – динка, нуэр, шиллук и мурле.

Судано-Сахельский регион занимает заметное место на террористической карте мира. Его доля в общемировом числе терактов составляет 7 %, по числу жертв – 13 %. В регионе находится один из мировых лидеров по интенсивности террористической деятельности в XXI веке Нигерия, активно и массово развивается терроризм в Мали, Камеруне, Буркина-Фасо и Нигере.



Этническая структура населения

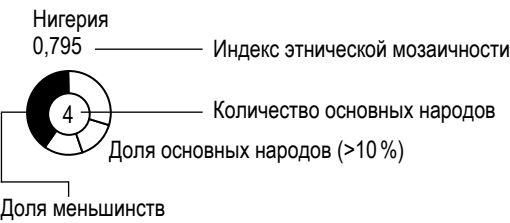


Рис. 5. Этническая структура населения стран Судано-Сахельского региона.
Fig. 5. The ethnic structure of the population of the countries of the Sudan-Sahel region.

Таблица 3.

АБСОЛЮТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕРРОРИСТИЧЕСКОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В СТРАНАХ СУДАНО-САХЕЛЬСКОГО РЕГИОНА
В 1970–2023 гг.
Table 3. Absolute indicators of terrorist activity in the countries
of the Sudan-Sahel region in 1970–2023

	Количество терактов	Количество жертв (человек)
Нигерия	6343	36919
Судан	1065	4851
Мали	1278	7985
Камерун	1079	4733
Буркина-Фасо	784	5844
Южный Судан	323	3983
Нигер	461	4863
Чад	146	2105
Сенегал	125	669
Мавритания	19	72
Эритрея	16	76
Всего	11639	72100

Источник: по данным [15].

Source: according to data [15].

Главным центром терроризма по абсолютным показателям (табл. 3) выступает Нигерия, которая также занимает 1 место в Африке и стабильно входит в ТОП-10 в мире. Основой такого уровня развития терроризма стало сочетание совокупности факторов – этнические конфликты, религиозный экстремизм на северо-востоке страны, столкновение экономических интересов в районах нефтедобычи. Условный «второй эшелон» распространения терроризма составляют Судан, Мали, Камерун и Буркина-Фасо. В этих странах терроризм главным образом отражал этнический сепаратизм, который в свою очередь развивался по разным сценариям. Наименее затронуты терроризмом в регионе Мавритания и Эритрея.

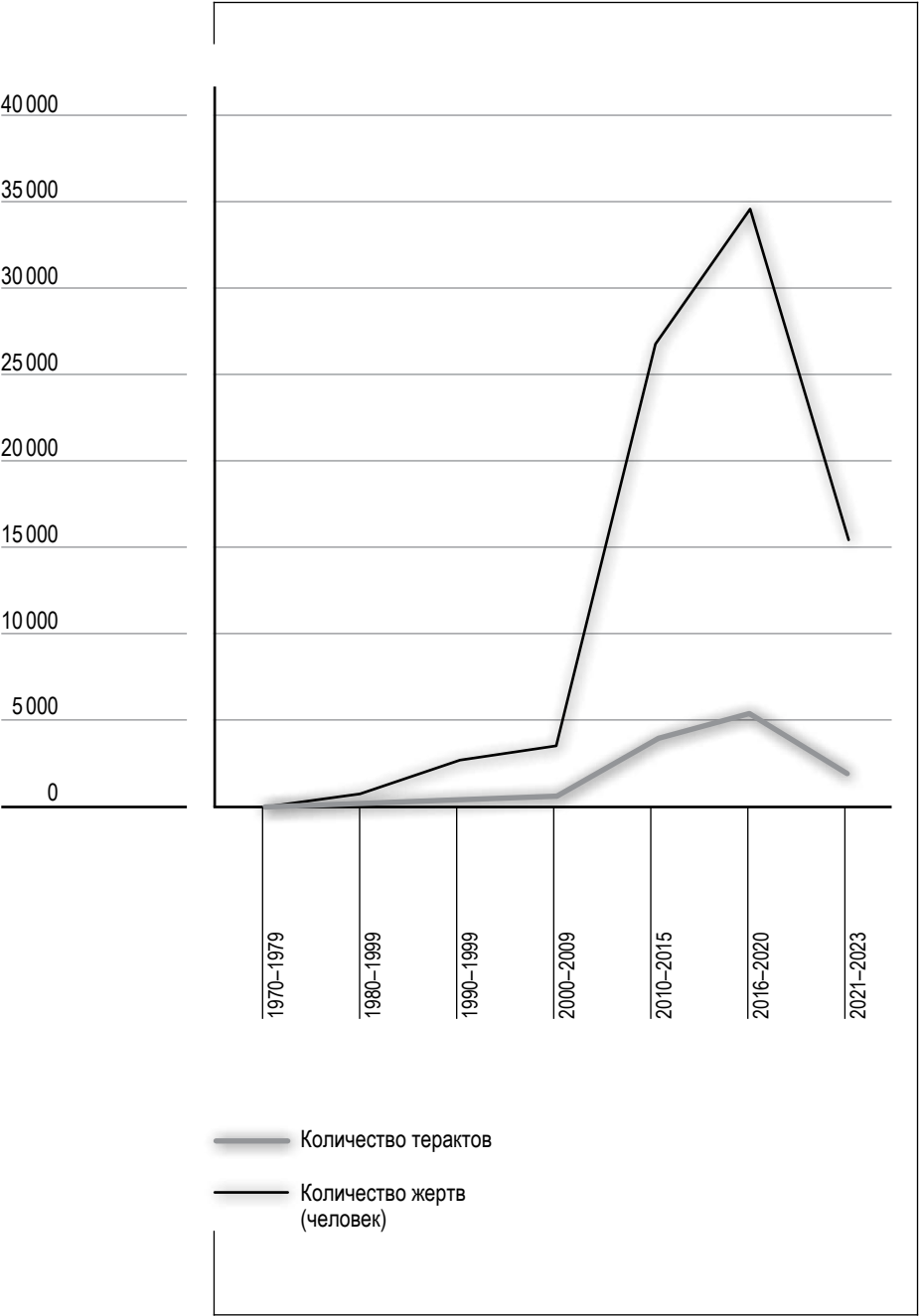


Рис. 6. Динамика террористической деятельности в Судано-Сахельском регионе в 1970-2023 гг.
Fig. 6. The dynamics of terrorist activity in the Sudan-Sahel region in 1970-2023.
Источник: по данным [15].
Source: according to data [15].

Активный рост террористической активности в регионе пришелся на конец 1980-х – начало 1990-х гг. Основными кризисами, формирующими «террористическую среду», стали: Суданская гражданская война 1983–2005 гг., геноцид в Руанде в 1994 г., гражданская война в Сомали, длящаяся с 1991 г., возобновление гражданской войны в Чаде в 2005 г., конфликт с 2004 г. в дельте Нигера [23]. В 2000–2010-е гг. многие африканские страны пережили заметные трансформации религиозного состава населения (в Нигерии число мусульман увеличилось в 2 раза), в том числе за счет миграций приверженцев ислама с территорий других государств. В это же время обостряется ситуация с сепаратизмом в Мали и Камеруне, в районе озера Чад формируется террористический район, контролируемый исламским радикальными группировками.

Доля отдельных стран в объеме террористических жертв в регионе дифференцирована и динамична (рис. 7). На протяжении 1970–1979 гг. террористическая деятельность в регионе только начинала свое развитие, в большинстве стран фиксируются лишь эпизодические проявления терроризма. В период 1980–1989 гг. отмечается рост террористической активности в регионе и выходом на ведущие роли Судана, Нигерии и Сенегала. В первой пятёрке сохраняют свои позиции Чад и Нигер. В 1990–1999 гг. в условиях продолжающегося роста террористической активности сохраняются страны-лидеры прошлых лет. На первое место выходит Нигерия, в которой происходят активные исламские мятежи. Появляются страны, ранее не отличавшиеся активной террористической деятельностью – Эритрея, Мали и Камерун.

2000–2009 годы отмечены сохранением лидерства Нигерии и Судана. Период 2010–2015 гг. интересен несколькими моментами. Активное и заметное увеличение количества террористических актов по сравнению с предыдущими периодами. Происходит рост терроризма в Судане и Мали. Остальные страны сохранили свои позиции с прошлого периода. Можно говорить о некой стабилизации «террористической карты» Судано-Сахельского региона. В 2016–2020 гг. ярко выражено увеличение объемов терроризма в Камеруне, Буркина-Фасо и Южном Судане. В 2021–2023 гг. отмечается снижение количества терактов, при этом Буркина-Фа-

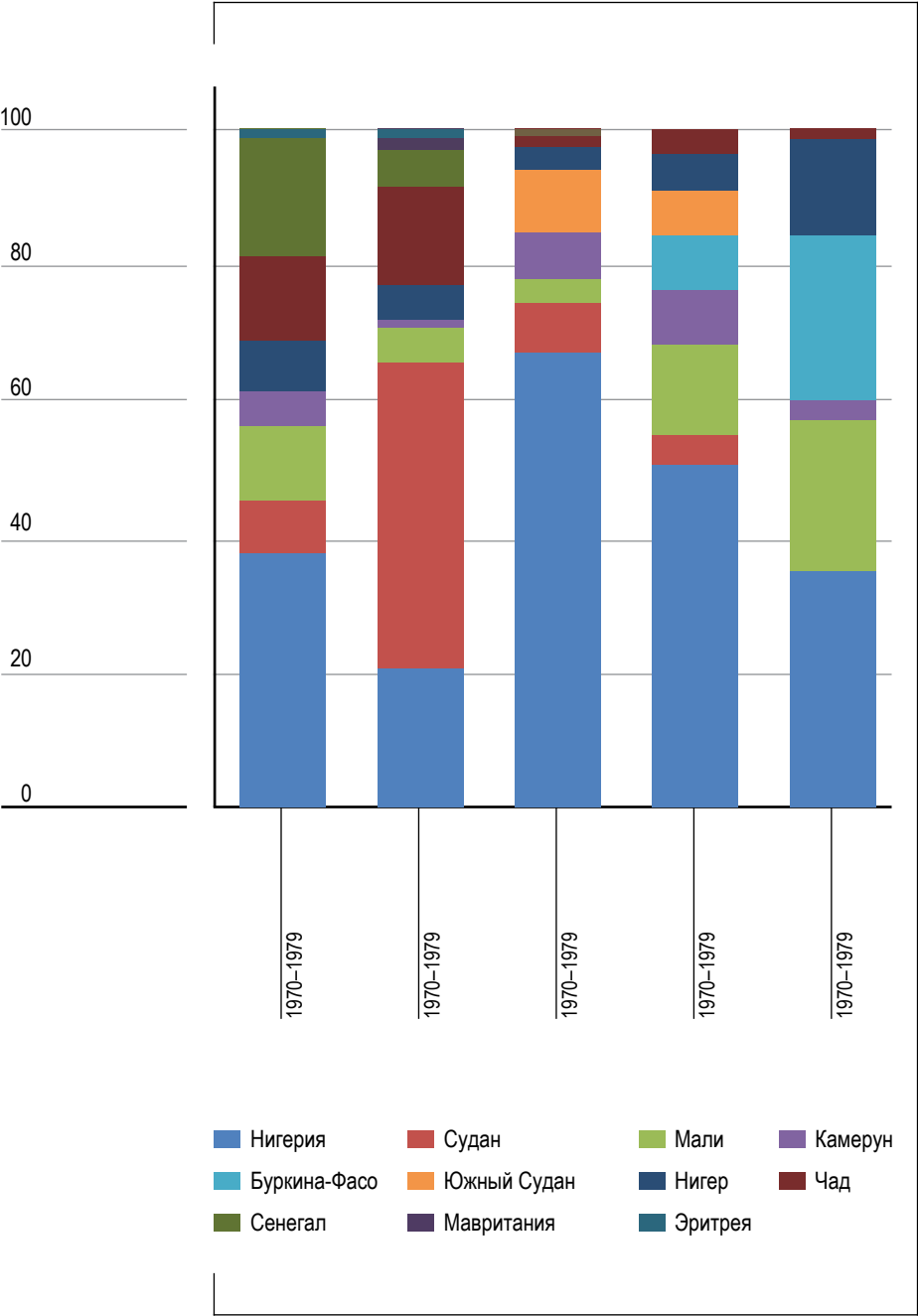


Рис. 7. Внутрорегиональная структура жертв терроризма в Судано-Сахельском регионе в 1990-2023 гг.
Fig. 7. Intraregional structure of victims of terrorism in the Sudan-Sahel region in 1990-2023.
Источник: по данным [15].
Source: according to data [15].

со выходит на ведущие позиции. Выделяется «пятерка лидеров» в Судано-Сахельском регионе: Нигерия, Буркина-Фасо, Мали, Нигер и Камерун.

Статистическая база исследования позволила выделить террористические центры региона (рис. 8) и изучить их географию. Наиболее развитый с точки зрения интенсивности и плотности террористической деятельности кластер сложился в районе озера Чад, в месте схождения границ четырех стран Сахеля – Чада, Камеруна, Нигера и Нигерии. В основе этого лежит функционирование самой известной и мощной террористической организации Африки – «Боко Харам». Фактически она является трансграничной, периодически перенося свою деятельность из одной страны в другую, при этом умело пользуясь внутривосточными конфликтами [24]. Чадский террористический кластер затрагивает следующие территории: в Камеруне – Крайнесеверный и Северо-Западный регионы; в Чаде – регионы Лак и Нджамена; в Нигере – регион Диффа; в Нигерии – штаты Борно и Адамава.

С точки зрения объема террористической деятельности, важнейшими после Чадского, выступают внутренние террористические кластеры Нигерии: Центральный, Восточный и Прибрежный. Исторически самым первым стал Восточный (штаты Тараба, Риверс и Бенуэ, а также соседний Юго-Западный регион Камеруна), который был связан с этническим сепаратизмом. Практически сразу после обретения независимости Нигерией в пограничной области с Камерун вспыхнул конфликт – образовалась самопровозглашенная Республика Биафра на основе сепаратизма народности игбо. Эти события дестабилизировали и соседние территории Камеруна, на которых с 1990-х гг. возникло еще одно непризнанное государство – Республика Амбазония. Все эти конфликты, кроме военной составляющей, сопровождались и активной террористической деятельностью. Рядом с Восточным кластером на территории штатов Байельса и Дельта сформировался Прибрежный. В его основе – экономический конфликт интересов различных групп за нефтяные месторождения в дельте реки Нигер. Особый масштаб он имел на рубеже 1990–2000-х гг. и сопровождался диверсиями на нефтедобывающей инфраструктуре, похищениями и морским пиратством. Наконец, Центральный террористический кластер (штаты Кадуна,

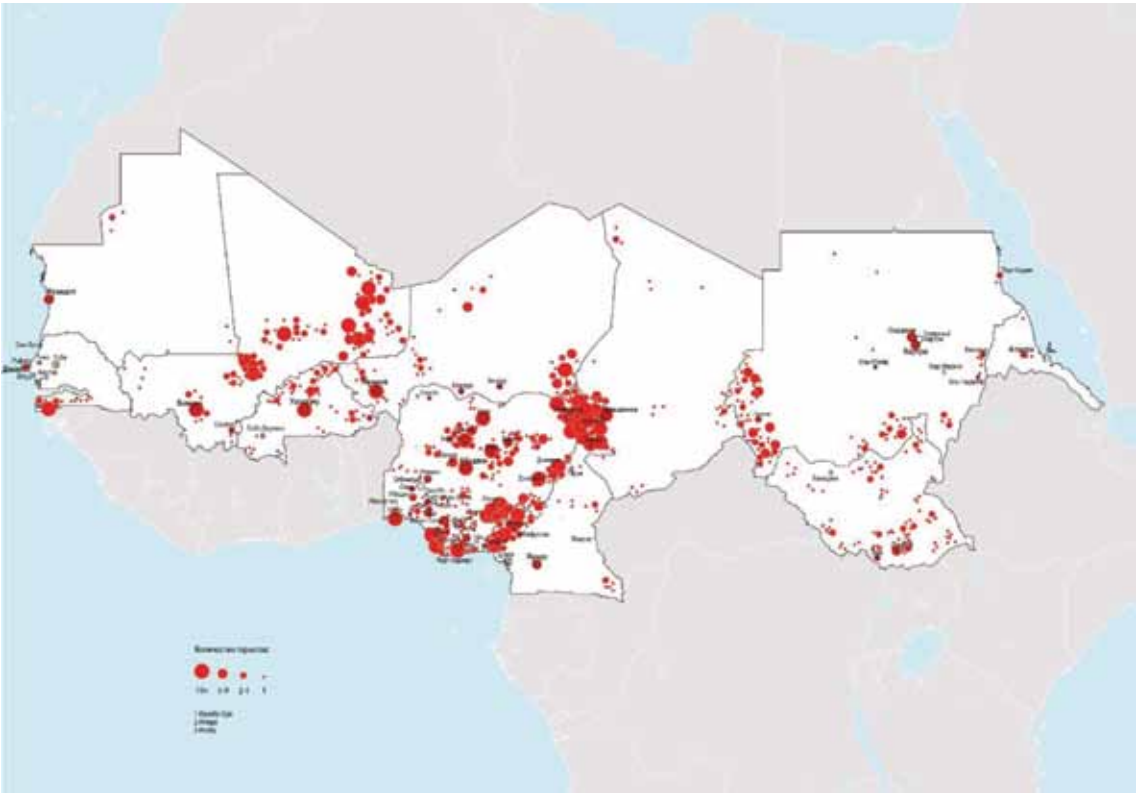


Рис. 8. География террористических центров Судано-Сахельского региона.
Fig. 8. The geography of terrorist centers in the Sudan-Sahel region.

Плато и Кано) является «экспортным» продолжением Чадском, на его территории радикалы-исламисты совершают крупный резонансные теракты.

Значимым для всего региона Сахель выступает Туарегский террористический кластер, охватывающий север и восток Мали и запад Нигера. Проблема, связанная с сепаратизмом туарегских племен, имеет еще колониальные корни, и была актуальна и после обретения независимости странами региона. В рамках последнего туарегского восстания 2012 года в конфликт на стороне туарегов включились почти все исламские террористические группировки Северной Африки [25]. В результате на некоторое время северо-восточная часть Мали (регионы Гао, Кидаль, Тимбукту и Менака) оказалась под их полным контролем, на этой территории было провозглашено государство Азавад [26]. Для военного решения конфликта потребовалась интервенция французских вооруженных сил в 2013 г., которая никак не сняла террористическую напряженность в регионе [27].

На востоке Судано-Сахельского региона можно выделить, как минимум, два террористических кластера – Дарфурский и Южно-Суданский, которые заметно отличаются от рассмотренных выше. Так, Дарфурский, охватывающий суданские регионы (Центральный Дарфур, Северный Дарфур, Южный Дарфур) и регионы Чада (Ваддай и Вади-Фера) формировался на базе этнического конфликта между «черным» и «арабоязычным» населением, которое поддерживало центральное правительство [26]. В силу специфики региона терроризм не стал главным средством борьбы, сразу уступив военным действиям и этническим чисткам с обеих сторон. Южно-Суданский кластер претерпел интересную эволюцию. В период 1970–1990-х гг. ведущим фактором был сепаратизм «черного» населения Южного Судана, который в итоге закончился отделением от Судана нового государства Южный Судан. При этом он не исчез, а трансформировался на почве межэтнического конфликта между народностями динка, нуэр и шиллук уже внутри Южного Судана. За пределами кластеров следует отметить очаги террористической деятельности в Буркина-Фасо, южном Сенегале, Нигере, центральном Мали.

Заключение

Проведенное исследование позволяет сделать несколько важных выводов.

1. В формировании политической нестабильности и развитии терроризма в регионе серьезную роль играют этнодемографические факторы, создающие точки внутреннего напряжения в обществе и повышающие конфликтогенные риски в странах Судано-Сахельского региона. К ним можно отнести рост числа несостоявшихся государств на континенте, прозрачность границ, насыщенность континента оружием, радикализацию ислама и значительный рост мусульманского населения, усиление социально-экономического неравенства, недовольство высоким уровнем коррупции, несправедливое распределение государственных доходов между центром и периферией, рост безработицы.
2. Динамика террористических показателей в регионе продолжает расти, происходит территориальный рост и расширение ареалов террористической деятельности. Сахель выступает главным регионом террористической нестабильности в Африке, и одной из критических опасных регионов развития терроризма в мире. На страновом уровне наибольшего развития терроризм достиг в Нигерии и в районе озера Чад.
3. Возможно выделить несколько террористических кластеров в Судано-Сахельском регионе – Чадский, Центральный, Восточный, Прибрежный, Туарегский, Дарфурский и Южно-Суданский. Они формировались под влиянием разных факторов, имеют разную динамику и особенности развития.

Список источников

1. Радченко Г. Ф. Страны Сахеля: Состояние природной среды и проблемы развития сельского хозяйства. М.: Мысль, 1983. 261 с.
2. Filippov V. Uranium Factor in France's Foreign Policy towards

- Africa // National Security. 2015. No. 3. P. 386–400. <https://doi.org/10.7256/2073-8560.2015.3.15671>
3. Ukiwo Uko. From "Pirates" to "Militants": a historical perspective on anti-state and anti-oil company mobilization among the Ijaw of Warri, Western NigerDelta // African Affairs. L. 2007. Vol. 106. No. 425. P. 587–610.
 4. Макутчев А. В. Война за ресурсы: абьеиский конфликт между Суданом и Южным Суданом // Ученые записки Орловского государственного университета. Серия: Гуманитарные и социальные науки. 2019. № 1 (82). С. 46-50.
 5. Захаров И. А., Горохов С. А., Дмитриев Р. В. Трансформация конфессионального пространства Африки в XX-начале XXI века // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. Т. 84. № 3. С. 359–368.
 6. Захаров И. А. Трансформация конфессионального пространства Африки в XX – начале XXI веков: дисс. ... канд. геогр. наук, специальность 25.00.24 Экономическая, социальная, политическая и рекреационная география. Москва, 2019. 168 с.
 7. Овсянникова Я. А. Деятельность «Боко Харам» как фактор дестабилизации положения в Западной Африке // Academy. 2019. № 6 (45). С. 116–119.
 8. Danjibo N. D. The Aftermath of the Arab Spring and Its Implication for Peace and Development in the Sahel and Sub-Saharan Africa // The Strategic Review for Southern Africa. 2013. Vol. 35. No. 2. P. 16–34. <https://doi.org/10.35293/srsa.v35i2.135>
 9. Attiya I. Li-tahdid al-munazamat wa al-irhab: masadir jadida li-tahdid al-amn fi Ifriqiya. Macallatul-buhus waddirasatil-qanuniyya was-siyasiyya // Journal of Legal and Political Research. 2017. No. 8. P. 53–70.
 10. Nyadera I., Massaoud H. Elusive Peace and the Impact of Ungoverned Space in the Sahel Conflict // Güvenlik Bilimleri Dergisi. 2019. Vol. 8. No. 2. P. 271–288. <https://doi.org/10.28956/gbd.646327>
 11. Dentice G. Terrorism in the Sahel Region: An Evolving Threat on Europe's Doorstep. Euromesco: Policy Brief, 2018. No. 80. P. 1–14.
 12. Нечитайло Д. А. «Аль-Каида» в Африке // Азия и Африка сегодня. 2007. № 11. С. 25–28.
 13. Супрунчук И. П. География терроризма. Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2020. 188 с.

14. Супрунчук И. П., Белозеров В. С., Полян П. М. Пространственно-временной анализ террористической активности: подход к исследованию и региональные особенности // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2017. № 3. С. 32–44. <https://doi.org/10.7868/S0373244417030033>
15. The Global Terrorism Database. URL: <https://www.start.umd.edu/gtd/> (accessed: 24.02.2025).
16. Uppsala Conflict Data Program. URL: <https://ucdp.uu.se> (accessed: 20.02.2025).
17. Armed Conflict Location & Event Data. URL: <https://acleddata.com> (accessed: 22.02.2025).
18. Справочное бюро по народонаселению ООН. URL: <https://www.prb.org> (дата обращения: 22.02.2025).
19. Всемирный банк World Development Indicators. URL: <https://databank.worldbank.org> (дата обращения: 24.02.2025).
20. Bloom D. E., Williamson J. G. Demographic Transitions and Economic Miracles in Emerging Asia. Working Paper 6268. Cambridge, 1997. M.A. NBER. <https://doi.org/10.3386/w6268>
21. Корендясов Е. Н. Кризис в Республике Мали. Конфликты в Африке: причины, генезис и проблемы урегулирования. М.: Институт Африки РАН. 2013. С. 304–327.
22. Манаков А. Г. Динамика этнической мозаичности территорий Северо-Западной России в 1897–2010 гг. // Региональные исследования. 2016. № 2 (52). С. 72–83. <https://doi.org/10.31857/S2587-556620192117-128>
23. Howard T. Failed states and the spread of terrorism in Sub-Saharan Africa // Studies in conflict and terrorism. 2010. Vol. 33. No. 11. 960–988.
24. Warner J. Sub-Saharan Africa's Three New Islamic State Affiliates. CTC Sentinel. 2017. Vol. 10. No. 1. P. 28-32.
25. Zimmerer M. Terror in West Africa: A Threat Assessment of the New Al Qaeda Affiliate in Mali. Critical Studies on Terrorism. 2019. Vol. 12. No. 3. P. 491–511. <https://doi.org/10.1080/17539153.2019.1599531>
26. Филиппов В. Р. Азавад – самопровозглашенное государство туарегов // Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право. 2021. Т. 14. № 1. С. 214–227. <https://doi.org/10.23932/2542-0240-2021-14-1-11>
27. Мезенцев С. В. Внутренние и международно-политические аспекты кризиса в Мали и французская операция

- «Сервал» // Вестник Московского университета. Серия 25. Международные отношения и мировая политика. 2014. № 1. С. 3–28.
28. Сизов С. Г., Малов Д. В. Историко-культурные и политические факторы межэтнических отношений на территории Северного и Южного Судана // Вестник Омского университета. 2012. № 1 (63). С. 340–345.

References

1. Radchenko GF. Sahel countries: The state of the natural environment and problems of agricultural development. Moscow: Mysl; 1983. 261 p. (In Russ.).
2. Filippov V. Uranium Factor in France's Foreign Policy towards Africa. National Security. 2015;(3):386-400. <https://doi.org/10.7256/2073-8560.2015.3.15671>
3. Ukiwo Ukoha. From "Pirates" to "Militants": a historical perspective on anti-state and anti-oil company mobilization among the Ijaw of Warri, Western NigerDelta. African Affairs. L. 2007;106(425):587-610.
4. Makutchev AV. War for resources: Abyel conflict between Sudan and South Sudan. Scientific notes of Orel State University. 2019;1(82):46-50. (In Russ.).
5. Zakharov IA, Gorokhov SA, Dmitriev RV. Transformation of African Religious Landscape in the 20th and Beginning of the 21st Century. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 2020;84(3):359-368. (In Russ.).
6. Zakharov IA. Transformation of the confessional space of Africa in the XX – early XXI centuries. Dissertation of cand. geogr. sciences, specialty 25.00.24 Economic, social, political and recreational geography. Moscow; 2019. 168 p. (In Russ.).
7. Ovsyannikova YaA. Boko Haram activities as a factor of destabilization of the situation in West Africa. Academy. 2019;6(45):116-119. (In Russ.).
8. Danjibo ND. The Aftermath of the Arab Spring and Its Implication for Peace and Development in the Sahel and Sub-Saharan Africa. The Strategic Review for Southern Africa. 2013;35(2):16-34. <https://doi.org/10.35293/srsa.v35i2.135>
9. Attiya I. Organized Crime and Terrorism: New Sources of Security Threats in Africa. Journal of Legal and Political Research. 2017;(8):53-70. (In Arab.).
10. Nyadera I, Massaoud H. Elusive Peace and the Impact of Un-governed Space in the Sahel Conflict. Güvenlik Bilimleri Der-

- gisi. 2019;8(2):271-288. <https://doi.org/10.28956/gbd.646327>
11. Dentice G. Terrorism in the Sahel Region: An Evolving Threat on Europe's Doorstep. Euromesco: Policy Brief. 2018;(80):1-14.
 12. Nechitailo DA. "Al-Qaeda" in Africa. Asia and Africa today. 2007;(11):25-28. (In Russ.).
 13. Suprunchuk IP. Geography of terrorism. Stavropol: NCFU Publishing House; 2020. 188 p. (In Russ.).
 14. Suprunchuk IP, Belozerov VS, Polyaniy PM. Spatial-temporal analysis of terrorist activity: approach to the study and regional peculiarities. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya. 2017;(3):32-44. (In Russ.).<https://doi.org/10.7868/S0373244417030033>
 15. The Global Terrorism Database. Available from: <https://www.start.umd.edu/gtd/> [Accessed 24 February 2025].
 16. Uppsala Conflict Data Program. Available from: <https://ucdp.uu.se> [Accessed 20 February 2025].
 17. Armed Conflict Location & Event Data. Available from: <https://acleddata.com> [Accessed 22 February 2025].
 18. United Nations Population Information Bureau. Available from: <https://www.prb.org> [Accessed 22 February 2025].
 19. World Bank World Development Indicators. Available from: <https://databank.worldbank.org> [Accessed 24 February 2025].
 20. Bloom DE, Williamson JG. Demographic Transitions and Economic Miracles in Emerging Asia. Working Paper 6268. Cambridge; 1997. M.A. NBER. <https://doi.org/10.3386/w6268>
 21. Korendyasov EN. The crisis in the Republic of Mali. Conflicts in Africa: causes, genesis and problems of settlement. Moscow: Institute of Africa of the Russian Academy of Sciences. 2013. P. 304-327. (In Russ.).
 22. Manakov AG. Dynamics of the ethnic mosaic of the territories of Northwestern Russia in 1897-2010. Regional studies. 2016;2(52):72-83. (In Russ.).<https://doi.org/10.31857/S2587-556620192117-128>
 23. Howard T. Failed states and the spread of terrorism in Sub-Saharan Africa. Studies in conflict and terrorism. 2010;33(11):960-988.
 24. Warner J. Sub-Saharan Africa's Three New Islamic State Affiliates. CTC Sentinel. 2017;10(1):28-32.
 25. Zimmerer M. Terror in West Africa: A Threat Assessment of the New Al Qaeda Affiliate in Mali. Critical Studies on Terrorism.

- 2019;12(3):491-511. <https://doi.org/10.1080/17539153.2019.1599531>
26. Filippov VR. Azawad As a Self-proclaimed Tuareg State. Outlines of global transformations: politics, economics, law. 2021;14(1):214-227. (In Russ.). <https://doi.org/10.23932/2542-0240-2021-14-1-11>
27. Mezentsev SV. Internal and international political aspects of the crisis in Mali and the French Operation Serval. Lomonosov World Politics Journal. 2014;(1):3-28. (In Russ.).
28. Sizov SG, Maslov DV. Historical, cultural and political factors of interethnic relations in Northern and Southern Sudan. Bulletin of Omsk University, 2012;1(63):340-345. (In Russ.).

Информация об авторах

Илья Павлович Супрунчук – кандидат географических наук, доцент департамента географии и геоинформатики Северо-Кавказского федерального университета, Scopus ID: 57199507380.

Галина Николаевна Жиренко – кандидат географических наук, доцент департамента географии и геоинформатики Северо-Кавказского федерального университета.

Анна Анатольевна Савченко – студентка 4 курса направления «География» департамента географии и геоинформатики Северо-Кавказского федерального университета.

Вклад авторов

Илья Павлович Супрунчук. Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Галина Николаевна Жиренко. Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

Анна Анатольевна Савченко. Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных.

Information about the authors

Ilya P. Suprunchuk – Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Department of Geography and Geoinformatics, North-Caucasus Federal University, Scopus ID: 57199507380.

Galina N. Zhirenko – Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor, the Department of Geography and Geoinformatics, North-Caucasus Federal University.

Anna A. Savchenko – 4th year student, Geography Course, Department of Geography and Geoinformatics, North-Caucasus Federal University.

Contribution of the authors

Ilya P. Suprunchuk. 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.

Galina N. Zhirenko. Text preparation and editing – drafting of the manuscript and its final version, contribution to the scientific layout.

Anna A. Savchenko. Conducting research – data collection, analysis and interpretation.



Научная статья
УДК 551.51
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.5>

О РЕЗУЛЬТАТАХ ТЕСТИРОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА КОАГУЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

Игорь Сергеевич Афанасьев^{1*},
Борис Азреталиевич Ашабоков²

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

² Институт информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра РАН (д. 37А, ул. И. Арманд, Нальчик, 360000, Российская Федерация)

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

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

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Объектом исследования являются коагуляционные процессы в облаках, которые представляют собой сложную термогидродинамическую и микрофизическую систему, отличающуюся нестационарностью, трехмерностью и нелинейностью. Эти особенности делают численное моделирование основным методом исследования эволюции облаков как в естественных условиях, так и при активном воздействии, что повышает требования к эффективности используемых численных методов, таким как устойчивость, сходимость и экономичность. Разработка или подбор методов, удовлетворяющих этим требованиям, требует тщательного исследования, включая предварительное тестирование этих методов путем сравнения результатов расчетов тестовых задач с их точными решениями. Исследование основано на анализе тестовых задач Коши для кинетического (интегро-дифференциального) уравнения и системы кинетических (интегро-дифференциальных) уравнений коагуляции в однофазных и двухфазных пространственно-однородных дисперсных системах. В ходе работы было установлено, что численные решения, полученные с помощью метода Бубнова – Галеркина и разработанного итерационно-матричного метода, являющегося модификацией метода конечных разностей, хорошо согласуются с аналитическими решениями. Эти методы продемонстрировали свою применимость для моделирования коагуляционных процессов в смешанных дисперсных системах, включая конвективные (градовые) облака. Высокая точность резуль-

татов численного решения тестовой задачи, связанной с коагуляционными процессами в дисперсной среде, по итогам проведенного исследования позволяет сделать вывод о том, что метод Бубнова-Галеркина и итерационно-матричный метод могут быть использованы для исследования микрофизических процессов в конвективных облаках. Численные эксперименты, основанные на этих методах, открывают перспективы для моделирования процессов формирования и развития облаков как в естественных условиях, так и при активном воздействии, в том числе опираясь на опыт, полученный в ходе предыдущих исследований других специалистов в данной области.

Ключевые слова: конвективное облако, коагуляция, кинетическое уравнение, однофазная и двухфазная среда, аналитическое и численное решение, метод Бубнова-Галеркина, итерационно-матричный метод

Для цитирования: Афанасьев И. С., Ашабоков Б. А. О результатах тестирования некоторых алгоритмов расчета коагуляционных процессов в дисперсных системах // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 2. С. 113–134. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.5>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.02.2025;
одобрена после рецензирования 25.04.2025;
принята к публикации 12.05.2025.

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

**On the results of testing some algorithms
for calculating coagulation processes
in dispersed systems**

**Igor S. Afanasyev^{1*},
Boris A. Ashabokov²**

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

² Institute of Informatics and Regional Management Problems, Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (37A, I. Armand St., Nalchik, 360000, 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>

* Corresponding author

Abstract.

The object of the study is coagulation processes in clouds, which are a complex thermo-hydrodynamic and microphysical system characterized by unsteadiness, three-dimensionality and nonlinearity. These features make numerical modeling the main method of studying the evolution of clouds both in natural conditions and under active influence, which increases the requirements for the effectiveness of the numerical methods used, such as stability, convergence and cost-effectiveness. The development or selection of methods that meet these requirements necessitates careful research, including preliminary testing of these methods by comparing the results of calculations of test problems with their exact solutions. The study is based on the analysis of Cauchy test problems for kinetic (integrodifferential) equations and systems of kinetic (integrodifferential) coagulation equations in single-phase and two-phase spatially homogeneous dispersed systems. In the course of the work, it was found that the numerical solutions obtained using the Bubnov-Galerkin method and the developed iterative matrix method, which is a modification of the finite difference method, are in good agreement with the analytical solutions. These methods have demonstrated their applicability for modeling coagulation processes in mixed dispersed systems, including convective (hail) clouds. The high accuracy of the results of the numerical solution of the test problem related to coagulation processes in a dispersed medium, based on the results of the study, allows us to conclude that the Bubnov-Galerkin method and the iterative matrix method can be used to study microphysical processes in convective clouds. Numerical experiments based on these methods open up prospects for modeling the processes of cloud formation and development both in natural conditions and under active exposure, including drawing on the experience gained in previous research by other specialists in the field.

Key words:

convective cloud, coagulation, kinetic equation, single-phase and two-phase medium, analytical and numerical solution, Bubnov-Galerkin method, iterative-matrix method

For citation:

Afanasyev IS, Ashabokov BA. On the results of testing some algorithms for calculating coagulation processes in dispersed systems. Science. Innovations. Technologies. 2025;(2):113-134. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.5>

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

The article was submitted 17.02.2025;
approved after reviewing 25.04.2025;
accepted for publication 12.05.2025.

Введение

Современное состояние физики облаков характеризуется сложностью и неоднозначностью. Это обусловлено тем, что, несмотря на недостаточную изученность многих «элементарных» процессов в облаках, существует необходимость исследовать их в целом, поскольку облака представляют собой сложные физические системы. Для дальнейшего развития этой научной области необходимо сформулировать новые направления исследований и решить соответствующие задачи с использованием современных методологий и методов [1].

Важно отметить, что агрегирование «элементарных» процессов в конвективных облаках, которое служит основой их математического моделирования, возможно только в рамках их численных моделей. Элементами этих моделей являются: система уравнений, описывающих динамику различных параметров облаков, начальные и граничные условия, численный метод для проведения расчетов и программное обеспечение [2, 3].

Следует подчеркнуть, что при разработке численных моделей конвективных облаков и проведении численных экспериментов, направленных на изучение их формирования и развития, как в естественных условиях, так и при активном воздействии, возникают значительные трудности. Одним из источников этих проблем является то, что облака представляют собой сложную термогидродинамическую и микрофизическую систему, особенностями которой являются нестационарность, трехмерность и нелинейность [1].

Цель настоящей работы заключается в исследовании возможности использования некоторых численных методов (метода Бубнова – Галеркина [4, 5] и итерационно-матричного метода [4–6]) для исследования роли системных свойств облаков в формировании их макро- и микроструктурных характеристик. Исследования проводились путем решения тестовых задач, в качестве которых использовались задачи Коши для интегро-дифференциального уравнения и системы интегро-дифференциальных уравнений (с известными аналитическими решениями), описывающих коагуляционные процессы в однофазных и двухфазных пространственно-однородных дисперсных системах [7]. Такой подход позволит оценить при-

менимость и точность указанных методов для численного моделирования облаков.

Материалы и методы исследований

Постановка задачи

Исследование коагуляционных процессов в однофазной среде основывается на расчете функции распределения частиц по массе $f(\xi, t)$. Это приводит к рассмотрению задачи Коши для интегро-дифференциального кинетического уравнения коагуляции, то есть необходимо найти неотрицательную функцию $f(\xi, t)$, удовлетворяющую следующим условиям [7]:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{кг}} = -f(\xi, t) \int_0^{\infty} K f(\xi, \eta) d\eta + \frac{1}{2} \int_0^{\xi} f(\xi - \eta, t) K(\xi - \eta, \eta) f(\eta, t) d\eta, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} t > 0, 0 < \xi < \infty; \\ f(\xi, 0) = f_0(\xi) \geq 0, (0 \leq \xi \leq \infty). \end{aligned} \quad (2)$$

При исследовании коагуляционных процессов в двухфазных средах используется задача Коши для системы из двух интегро-дифференциальных кинетических уравнений. В этом случае необходимо найти функции распределения $f_1(\xi, t)$ и $f_2(\xi, t)$ для частиц двух типов, которые должны удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_1(\xi, t)}{\partial t} &= I_{11}(f_1, f_1) + I_{12}(f_1, f_2), \\ \frac{\partial t_2(\xi, t)}{\partial t} &= I_{21}(f_2, f_1) + I_{22}(f_2, f_2), \\ t > 0, 0 < \xi < \infty; \end{aligned} \quad (3)$$

$$f_1(\xi, 0) = f_1^{(0)}(\xi) \geq 0, f_2(\xi, 0) = f_2^{(0)}(\xi) \geq 0, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} I_{pl}(f_p, f_l) &= - \int_0^{\infty} K_{pl}(\xi, \eta) f_p(\xi - \eta, t) f_l(\eta, t) d\eta + \\ &+ c_{pl} \cdot \int_0^{\xi} K_{pl}(\xi - \eta, \eta) f_p(\xi - \eta, t) f_l(\eta, t) d\eta; \end{aligned} \quad (5)$$

$p, l = 1, 2; c_{11} = 1, c_{12} = 0, c_{21} = 2, c_{22} = 1.$

В случае однофазных сред справедливы выражения:

$$\int_0^{\infty} f_0(\zeta) d\zeta = 1, \quad \int_0^{\infty} \zeta f_0(\zeta) d\zeta = 1, \quad K(\zeta, \eta), \quad K(\eta, \zeta) \geq 0, \\ (0 \leq \zeta, \eta \leq \infty).$$

А в случае двухфазных сред эти выражения записываются в виде:

$$\int_0^{\infty} \zeta [f_1(\zeta, t) + f_2(\zeta, t)] d\zeta = \text{const},$$

$$K_{ij}(\zeta, \eta) = K_{ij}(\eta, \zeta) = K_{ij}(\zeta, \eta) \geq 0.$$

В выражениях (1)–(5) использованы обозначения: $f(\zeta, t)$ и $f_i(\zeta, t)$ ($i = 1, 2$) – функция распределения частиц по массе в однофазной и двухфазной среде (облаке), ζ и η – массы частиц, t – время, $K(\zeta, t)$ и $K_{ij}(\zeta, t)$ ($i = 1, 2; j = 1, 2$) – коэффициенты коагуляции, характеризующие вероятности парных столкновений частиц в однофазной и двухфазной среде (i -го и j -го сортов) с массами ζ и η . Задачи (1)–(2) и (3)–(4) записаны в безразмерной форме.

Ниже результаты решения этих задач методом Бубнова – Галеркина и итерационно-матричным методом сравниваются с аналитическими решениями.

Метод Бубнова – Галеркина

Согласно методу Галеркина, приближенное решение задачи (1)–(2) ищется в виде линейной комбинации [7]:

$$f^N(\zeta, t) = \sum_{i=1}^N a_i(t) D_i(\alpha, \zeta), \quad (6)$$

где $a_i(t)$ – подлежащие определению коэффициенты;
 $D_i(\alpha, t)$ – система функций, ортонормированная на $(0, \infty)$;
 α – параметр ($\alpha > 0$).

Приближенные решения задачи (3)–(4) ищут в виде:

$$\begin{aligned} f^N(\zeta, t) &= \sum_{i=1}^N a_i(t) D_i(\alpha, \zeta) \\ f_2^N(\zeta, t) &= \sum_{i=1}^N b_i(t) D_i(\alpha, \zeta), \end{aligned} \quad (7)$$

где $a_i(t)$ и $b_i(t)$ неизвестные коэффициенты.

В выражениях (6) и (7) функции $D_i(\alpha, \zeta)$ записываются в виде:

$$\begin{aligned} D_i(\alpha, \zeta) &= \sum_{k=1}^i C_{ki} \exp(-\alpha k \zeta), \\ C_{ki} &= \frac{2\alpha i(i+k-1)}{k!(k-1)!(i-k)!(-1)^{i-k}} \end{aligned}$$

Тогда решение задачи (1)–(2) сводится к решению задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) [7]:

$$\frac{da_m(t)}{dt} = \sum_{i,j=1}^N a_i(t) a_j(t) \cdot A_{ij}^m; \quad m = 0, 1, \dots, N. \quad (8)$$

$$a_m^0(t) = \int_0^\infty f_0(\zeta) D_m(\alpha, \zeta) d\zeta. \quad (9)$$

$$\begin{aligned} A_{ij}^m &= - \int_0^\infty \int_0^\infty K(\zeta, \eta) D_i(\alpha, \zeta) D_j(\alpha, \eta) D_m(\alpha, \zeta) d\eta d\zeta + \\ &+ \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_0^\infty K(\zeta - \eta, \eta) D_i(\alpha, \zeta - \eta) D_j(\alpha, \eta) D_m(\alpha, \zeta) d\eta d\zeta. \end{aligned}$$

Таким же образом решение задачи (3)–(4) сводится к решению задачи Коши для системы обыкновенных дифференциальных уравнений для неизвестных коэффициентов $a_m(t)$ и $b_m(t)$:

$$\begin{aligned} \frac{da_m(t)}{dt} &= \sum_{i,j=1}^N a_i(t) a_j(t) \cdot B_{ij,m}^{11} + \sum_{i,j=1}^N a_i(t) b_j(t) \cdot B_{ij,m}^{12}, \\ \frac{db_m(t)}{dt} &= \sum_{i,j=1}^N b_i(t) a_j(t) \cdot B_{ij,m}^{21} + \sum_{i,j=1}^N b_i(t) b_j(t) \cdot B_{ij,m}^{22}, \\ (m &= 0, 1, \dots, N), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} a_m^0(t) &= \int_0^\infty f_1^0(\zeta) D_m(\alpha, \zeta) d\zeta; \\ b_m^0(t) &= \int_0^\infty f_2^0(\zeta) D_m(\alpha, \zeta) d\zeta; \end{aligned} \quad (11)$$

где параметр $B_{i,j,m}^{pl}$ равен выражению:

$$B_{i,j,m}^{pl} = \int_0^{\infty} D_m(\alpha, \zeta) I_{pl}(D_b, D_j) d\zeta;$$

$$p, l = 1, 2;$$

$$i, j, m = 1, 2, 3 \dots, N.$$

Решения задач (8)–(9) и (10)–(11) подставляются в выражения (6) и (7) и в результате получаем приближенные решения задач (1)–(2) и (3)–(4).

Итерационно-матричный метод

Для начала рассмотрим уравнение (1) с заданным начальным условием (2). Согласно методу конечных разностей [8], в выражении (1) можно сделать замену: $(\frac{\partial f}{\partial t}) \rightarrow \frac{f_{n+1} - f_n}{\Delta t}$, где Δt – шаг по времени, f_{n+1} и f_n – значения функции распределения частиц по массе в соседние моменты времени $n + 1$ и n . Аналогично преобразуем интегралы в сумму с шагом по массе $\Delta \eta$ ($\Delta \zeta = \Delta \eta$). Тогда в итерационной (явной) форме решение задачи (1)–(2) имеет вид:

$$f_i^{n+1} = f_i^n \left(1 - \Delta \eta \Delta t \sum_{j=0}^M K_j f_j^n \right) + \frac{1}{2} \sum_{j=0}^i K_{i-j} f_{i-j}^n f_i^n \Delta \eta \Delta t, \quad (12)$$

$$f_i^0 = f_0(i \Delta \eta) \geq 0, \quad (0 \leq i \leq M) \quad (13)$$

где конечному элементу суммы с индексом $j = M$ соответствует Ξ – наибольшая предельная масса (вместо ∞), для масс выполнена замена переменных на соответствующие им индексы: $\zeta \rightarrow i, \eta \rightarrow j$.

Рассмотрим значения выражения f_i^{n+1} в (12) при различных индексах $i = 0, 1, \dots, m, \dots, M$, где m – некоторый индекс массы частицы. В правой части в первом слагаемом содержится постоянный множитель $C_n = \sum_{j=0}^M K_j f_j^n$.

Также введём векторы (аналог одномерной матрицы в линейной алгебре) для функции распределения частиц и коэффициента коагуляции:

$$F^n = (f_0^n \ f_1^n \ f_2^n \dots f_m^n \dots f_M^n),$$

$$K = (K_0 \ K_1 \ K_2 \dots K_m \dots K_M^n).$$

Вектор функции распределения F^n задан для частиц по массам $\xi_i = i\Delta\eta$: $W = (\xi_0 \xi_1 \xi_2 \dots \xi_m \dots \xi_M) = (0 \Delta\eta 2\Delta\eta \dots \xi_m \dots \Xi)$, где $\xi = \xi_m$ – масса некоторой частицы, Ξ – наибольшая предельная масса, $\Xi \gg \xi_m$ (в дальнейшем полагаем, что $\Xi \geq 10\xi_m$).

Зададим вектор линейной или аperiodической свертки $S^n = (s_0^n s_1^n \dots s_m^n s_M^n)$, где элемент вектора свертки S_i^n равен выражению: $S_i^n = \sum_{j=0}^i f_{i-j}^n g_j^n$, здесь $f_{i-j}^n = K_{i-j} f_{i-j}^n$, $g_j^n = f_j^n$. Вычисление вектора свертки S^n осуществлялось методом быстрой свертки [9].

Тогда в итерационно-матричной форме [4] решение интегродифференциального кинетического уравнения, с учётом полученной ранее записи (12)–(13), имеет вид:

$$F^{n+1} = F^n - \Delta\eta\Delta t C^n \cdot F^n + \frac{1}{2} \Delta\eta\Delta t \cdot S^n, \quad (14)$$

$$F^0 = F^0(W). \quad (15)$$

В случае двухфазной среды в результате решения задачи (3)–(4) получаем систему уравнений итерационно-матричным методом по аналогии с полученными выражениями для коагуляции в однофазной среде (14)–(15):

$$F_1^{n+1} = F_1^n + \Delta\eta\Delta t (I_{11}^n + I_{12}^n), \quad (16)$$

$$F_2^{n+1} = F_2^n + \Delta\eta\Delta t (I_{21}^n + I_{22}^n).$$

$$F_1^0 = F_1^0(W); F_2^0 = F_2^0(W). \quad (17)$$

где I_{pl}^n – векторная запись подынтегрального выражения $I_{pl}^n(f_p, f_l)$ (5), здесь $p, l = 1, 2$. В общей форме I_{pl}^n можно представить в виде:

$$I_{pl}^n = C_{pl} \cdot F_p^n + c_{pl} \cdot S_{pl}^n;$$

$$C_{pl} = \sum_{j=0}^M K_{pl,j} f_{l,j}^n;$$

$$c_{11} = 1, c_{12} = 0, c_{21} = 2, c_{22} = 1,$$

где элемент вектора свертки $S_{pl,i}^n$ равен выражению:

$$S_{pl,i}^n = \sum_{j=0}^l f'_{pl,i-j}^n g_{pl,j}^n,$$

здесь $f'_{pl,i-j}^n = K_{pl,i-j}, g_{pl,j}^n = f_{lj}^n.$

Таким образом, при решении матрично-итерационного уравнения (14)–(15) F^{n+1} для некоторого момента времени $t = N\Delta t$ находят константу C^n и вектор S^n на каждом шаге итерации $n = 0, 1, 2, \dots, N$, где N – количество итераций. Совокупность векторов F^n представляет собой функцию распределения $f^{N2}(\xi, t)$. Аналогично для двухфазной среды (16)–(17) матрично-итерационный метод находит F_1^n и F_2^n , в результате получают численные результаты функции распределения частиц $F_1^n(\xi, t)$ и $F_2^n(\xi, t)$. Размер вектора F^n (F_1^n и F_2^n) равен $M = \Xi / \Delta\eta + 1$, где Ξ – наибольшая предельная масса частицы (используется вместо ∞), $\Delta\eta$ – шаг по массе.

Дополнительно стоит отметить, что при переходе к задачам коагуляции с N -мерным пространством функция распределения F^n будет записана в виде $N + 1$ -мерной матрицы (в данной задаче пространство безразмерное, поэтому имеем дело с одномерной матрицей или вектором).

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты вычислений для коагуляционных процессов в однофазной среде получены при следующих начальных условиях и коэффициенте коагуляции: $f_0(\xi) = \exp(-\xi)$, $K(\xi, t) = 1$. В случае двухфазной среды они получены при начальных условиях $f_1^{(0)}(\xi) = f_2^{(0)}(\xi) = \exp(-\xi)$ и коэффициенте коагуляции $K_{ij}(\xi, t) = 1$ ($i = 1, 2; j = 1, 2$).

Точное решение уравнения коагуляции в однофазной среде (1)–(2) при этих условиях имеет вид [7]:

$$f(\xi, t) = \left(\frac{2}{2+t} \right)^2 \exp \left(\frac{-2}{2+t} \xi \right). \quad (18)$$

а точные решения системы уравнений коагуляции в двухфазной среде (3)–(4) записывают в виде:

$$\begin{aligned} f_1(\xi, t) &= \left(\frac{1}{1+t}\right)^2 \exp\left(-\frac{2+t}{2+2t}\xi\right); \\ f(\xi, t) &= 2\left(\frac{1}{1+t}\right)^2 \exp\left(-\frac{1}{1+t}\xi\right); \\ f_2(\xi, t) &= f(\xi, t) - f_1(\xi, t). \end{aligned} \tag{19}$$

Функция $f(\xi, t) = f_1(\xi, t) + f_2(\xi, t)$ введена для удобства при аналитическом решении задачи (3)–(4).

Далее аналитические решения задач (1)–(2) и (3)–(4) сравниваются с численными решениями $f^N(\xi, t)$ и $f_1^N(\xi, t), f_2^N(\xi, t)$, полученными методом Бубнова – Галеркина (N_1) и итерационно-матричным методом (N_2).

Для решения задачи (1)–(2) методом Бубнова – Галеркина используют выражения (6), (8)–(9), матрично-итерационным методом – (14) и (15). Аналогично для задачи (3)–(4) решение методом Бубнова – Галеркина найдено с использованием выражений (7), (10)–(11), матрично-итерационным методом – (16) и (17).

Значения точного решения, приближенного решения методом Бубнова–Галеркина $f^{N_1}(\xi, t)$ (оптимальное решение достигается при заданных параметрах: $N=7, \alpha=0,5, \Delta t=5 \cdot 10^{-4}$) и итерационно-матричным методом $f^{N_2}(\xi, t)$ $\Delta \eta = 0,01, \Delta t = 5 \cdot 10^{-4}$ и $M = 10001$ — в этом случае предельная масса частицы равна $\Xi = 100$) задачи (1)–(2) приведены в таблице 1. Аналогично в таблице 2 приведены значения этих же решений задачи (3)–(4).

Функции распределения $f(\xi, t)$ и $f_1(\xi, t), f_2(\xi, t)$, массы частиц ξ и время t в данной задачи безразмерные, измеряются в единицах (ед.).

Таблица 1. ЗНАЧЕНИЯ ТОЧНОГО $f(\xi, t)$ И ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ (1)–(2) МЕТОДОМ БУБНОВА–ГАЛЕРКИНА $f^{N_1}(\xi, t)$ И ИТЕРАЦИОННО-МАТРИЧНЫМ МЕТОДОМ $f^{N_2}(\xi, t)$
Table 1. Values of the exact $f(\xi, t)$ and approximate solution of the problem (1)–(2) by the Bubnov – Galerkin method $f^{N_1}(\xi, t)$ and the iterative matrix method $f^{N_2}(\xi, t)$

ξ	$t = 3$			$t = 10$		
	$f_1(\xi, t)$	$f_1^{N_1}(\xi, t)$	$f_1^{N_2}(\xi, t)$	$f_2(\xi, t)$	$f_2^{N_1}(\xi, t)$	$f_1^{N_2}(\xi, t)$
0	0,160	0,162	0,160	0,028	0,035	0,028
0,4	0,136	0,136	0,137	0,026	0,028	0,026

Таблица 1. ОКОНЧАНИЕ

ξ	$t = 3$			$t = 10$		
	$f_1(\xi, t)$	$f_1^{N1}(\xi, t)$	$f_1^{N2}(\xi, t)$	$f_2(\xi, t)$	$f_2^{N1}(\xi, t)$	$f_1^{N2}(\xi, t)$
0,8	0,116	0,117	0,116	0,024	0,025	0,024
1,2	0,099	0,099	0,099	0,023	0,025	0,023
1,6	0,084	0,084	0,085	0,021	0,024	0,021
2	0,072	0,071	0,072	0,020	0,021	0,020
2,4	0,061	0,061	0,061	0,019	0,020	0,019
2,8	0,052	0,052	0,052	0,017	0,017	0,017
3,2	0,044	0,045	0,045	0,016	0,016	0,016
3,6	0,038	0,039	0,038	0,015	0,016	0,015
4	0,032	0,033	0,032	0,014	0,016	0,014
4,4	0,028	0,028	0,028	0,013	0,016	0,013
4,8	0,023	0,024	0,023	0,012	0,016	0,013
5,2	0,020	0,020	0,020	0,012	0,015	0,012
5,6	0,017	0,017	0,017	0,011	0,014	0,011
6	0,015	0,014	0,015	0,010	0,012	0,010
6,4	0,012	0,012	0,012	0,010	0,012	0,010
6,8	0,011	0,010	0,011	0,009	0,009	0,009
7,2	0,009	0,008	0,009	0,008	0,009	0,008
7,6	0,008	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008
8	0,007	0,006	0,007	0,007	0,007	0,007
8,4	0,006	0,005	0,006	0,007	0,006	0,007
8,8	0,005	0,004	0,005	0,006	0,005	0,006
9,2	0,004	0,003	0,004	0,006	0,004	0,006
9,6	0,003	0,003	0,003	0,006	0,003	0,006
10	0,003	0,002	0,003	0,005	0,003	0,005

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

Таблица 2. ЗНАЧЕНИЯ ТОЧНЫХ $f_1(\xi, t)$, $f_2(\xi, t)$ И ПРИБЛИЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ (3)–(4) МЕТОДОМ БУБНОВА–ГАЛЕРКИНА $f_1^{N1}(\xi, t)$, $f_2^{N1}(\xi, t)$ И ИТЕРАЦИОННО-МАТРИЧНЫМ МЕТОДОМ $f_1^{N2}(\xi, t)$, $f_2^{N2}(\xi, t)$
Table 2. Values of exact $f_1(\xi, t)$, $f_2(\xi, t)$ and approximate solutions of problem (3)–(4) by the Bubnov – Galerkin method $f_1^{N1}(\xi, t)$, $f_2^{N1}(\xi, t)$ and the iterative-matrix method $f_1^{N2}(\xi, t)$, $f_2^{N2}(\xi, t)$

ξ	$t = 1$					
	$f_1(\xi, t)$	$f_1^{N1}(\xi, t)$	$f_1^{N2}(\xi, t)$	$f_2(\xi, t)$	$f_2^{N1}(\xi, t)$	$f_2^{N2}(\xi, t)$
0	0,250	0,249	0,250	0,250	0,250	0,251
0,2	0,215	0,215	0,215	0,237	0,237	0,238
0,4	0,185	0,185	0,185	0,224	0,224	0,225
0,6	0,159	0,159	0,159	0,211	0,211	0,212
0,8	0,137	0,137	0,137	0,198	0,198	0,199
1	0,118	0,118	0,118	0,185	0,185	0,186
1,2	0,102	0,101	0,102	0,173	0,172	0,174
1,4	0,087	0,087	0,087	0,161	0,160	0,162
1,6	0,075	0,075	0,075	0,149	0,149	0,150
1,8	0,065	0,065	0,065	0,138	0,138	0,139
2	0,056	0,056	0,056	0,128	0,128	0,129
2,2	0,048	0,048	0,048	0,118	0,118	0,119
2,4	0,041	0,041	0,041	0,109	0,109	0,110
2,6	0,036	0,036	0,036	0,101	0,100	0,101
2,8	0,031	0,031	0,031	0,093	0,092	0,093
3	0,026	0,026	0,026	0,085	0,085	0,086
3,2	0,023	0,023	0,023	0,078	0,078	0,079
3,4	0,020	0,019	0,020	0,072	0,072	0,072
3,6	0,017	0,017	0,017	0,066	0,066	0,066
3,8	0,014	0,014	0,014	0,060	0,060	0,061
4	0,012	0,012	0,012	0,055	0,055	0,056
4,2	0,011	0,011	0,011	0,051	0,051	0,051
4,4	0,009	0,009	0,009	0,046	0,046	0,047
4,6	0,008	0,008	0,008	0,042	0,042	0,043
4,8	0,007	0,007	0,007	0,039	0,038	0,039
5	0,006	0,006	0,006	0,035	0,035	0,035

Таблица 2. ОКОНЧАНИЕ

ξ	$t = 25$					
	$f_1(\xi, t)$	$f_1^{N1}(\xi, t)$	$f_1^{N2}(\xi, t)$	$f_2(\xi, t)$	$f_2^{N1}(\xi, t)$	$f_2^{N2}(\xi, t)$
0	0,082	0,083	0,080	0,082	0,090	0,082
0,2	0,072	0,073	0,071	0,082	0,082	0,082
0,4	0,063	0,064	0,062	0,083	0,086	0,083
0,6	0,056	0,056	0,055	0,082	0,084	0,082
0,8	0,049	0,049	0,048	0,081	0,081	0,081
1	0,043	0,044	0,043	0,080	0,079	0,080
1,2	0,038	0,038	0,037	0,078	0,078	0,078
1,4	0,033	0,034	0,033	0,076	0,078	0,077
1,6	0,029	0,030	0,029	0,074	0,077	0,075
1,8	0,026	0,026	0,026	0,072	0,075	0,072
2	0,023	0,023	0,023	0,070	0,072	0,070
2,2	0,020	0,020	0,020	0,067	0,069	0,068
2,4	0,017	0,018	0,017	0,065	0,066	0,065
2,6	0,015	0,016	0,015	0,062	0,062	0,063
2,8	0,013	0,014	0,014	0,060	0,059	0,060
3	0,012	0,012	0,012	0,057	0,056	0,058
3,2	0,010	0,011	0,011	0,055	0,054	0,056
3,4	0,009	0,009	0,009	0,053	0,051	0,053
3,6	0,008	0,008	0,008	0,050	0,050	0,051
3,8	0,007	0,007	0,007	0,048	0,048	0,049
4	0,006	0,006	0,006	0,046	0,047	0,047
4,2	0,005	0,006	0,006	0,044	0,045	0,044
4,4	0,005	0,005	0,005	0,042	0,044	0,042
4,6	0,004	0,004	0,004	0,040	0,042	0,040
4,8	0,004	0,004	0,004	0,038	0,041	0,038
5	0,003	0,003	0,003	0,036	0,039	0,037

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

Результаты расчетов для промежутков времени t до 10 ед. при однофазовой коагуляции и до 2,5 ед. при двухфазовой коагуляции показывают хорошее согласие приближенных решений задач (1)–(2) и (3)–(4) с точными. Однако матрично-итерационный метод оказывается более точным, для него погрешность приближенных функций распределения $\Delta f^N(\xi, t)$ не превышает $\pm 0,002$. Для повышения точности расчетов методом Бубнова – Галеркина необходимо дополнительно решать задачи оптимизации, которые рассмотрены в других работах, включая исследования более сложных математических моделей в физике облаков [7]

Кроме того, рассмотрено решение задачи двухфазовой коагуляции (3)–(4) для более поздних моментов времени с помощью матрично-итерационного метода. Результаты, приведенные в таблице 3 для момента времени $t = 25$ ед., аналогично показывают хорошее согласие приближенных решений задачи (3)–(4) с точными, относительная погрешность функций распределения $\Delta f^N(\xi, t)$ не превышает 10 %. При этом, значения функции распределения $f(\xi, t)$ имеют порядок 0,0001–0,001, тогда как заданные шаги по массе и времени равны $\Delta \eta = 0,01$, $\Delta t = 5 \cdot 10^{-4}$ соответственно. Это подтверждает эффективность (высокую работоспособность) разработанного матрично-итерационного метода, который в текущей работе является модификацией метода конечных разностей.

Таблица 3. ЗНАЧЕНИЯ ТОЧНЫХ $f_1(\xi, t)$, $f_2(\xi, t)$ И ПРИБЛИЖЕННЫХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ (3)–(4) ИТЕРАЦИОННО-МАТРИЧНЫМ МЕТОДОМ $f_1(\xi, t)$, $f_2(\xi, t)$ В БОЛЕЕ ПОЗДНИЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ ($t = 25$ ед.)
Table 3. Values of exact $f_1(\xi, t)$, $f_2(\xi, t)$ and approximate solutions of problem (3)–(4) by the iterative-matrix method $f_1(\xi, t)$, $f_2(\xi, t)$ at a later point in time ($t = 25$ units)

	$t = 25$			
ξ	$f_1(\xi, t)$	$f_1^M(\xi, t)$	$f_2(\xi, t)$	$f_2^M(\xi, t)$
0	0,00148	0,00143	0,00148	0,00146
0,2	0,00133	0,00129	0,00160	0,00158
0,4	0,00120	0,00117	0,00171	0,00169
0,6	0,00108	0,00105	0,00181	0,00178
0,8	0,00098	0,00095	0,00189	0,00186

Таблица 3. ОКОНЧАНИЕ

ξ	$t = 25$			
	$f_1(\xi, t)$	$f_1^{N1}(\xi, t)$	$f_2(\xi, t)$	$f_2^{N2}(\xi, t)$
1	0,00088	0,00086	0,00197	0,00194
1,2	0,00079	0,00077	0,00203	0,00200
1,4	0,00072	0,00070	0,00209	0,00206
1,6	0,00064	0,00063	0,00214	0,00210
1,8	0,00058	0,00057	0,00218	0,00215
2	0,00052	0,00051	0,00222	0,00218
2,2	0,00047	0,00046	0,00225	0,00221
2,4	0,00043	0,00042	0,00227	0,00224
2,6	0,00038	0,00038	0,00229	0,00226
2,8	0,00035	0,00034	0,00231	0,00228
3	0,00031	0,00031	0,00232	0,00229
3,2	0,00028	0,00028	0,00234	0,00230
3,4	0,00025	0,00025	0,00234	0,00231
3,6	0,00023	0,00022	0,00235	0,00232
3,8	0,00021	0,00020	0,00235	0,00232
4	0,00019	0,00018	0,00235	0,00232
4,2	0,00017	0,00016	0,00235	0,00232
4,4	0,00015	0,00015	0,00235	0,00232
4,6	0,00014	0,00013	0,00234	0,00231
4,8	0,00012	0,00012	0,00234	0,00231
5	0,00011	0,00011	0,00233	0,00230

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

В качестве особенностей методов можно отметить:

- метод Бубнова–Галеркина требует количество вычислений (операций), пропорциональное N^3 , также для повышения точности результатов необходимо решать задачи оптимизации (например, минимиза-

ция функционала). Но стоит отметить, что данный метод позволяет определять распределение частиц на неограниченном диапазоне масс.

— матрично-итерационный метод является модификацией метода конечных разностей, он упрощает вычисления и не требует дополнительных параметров. Однако дискретность масс частиц является значимым недостатком этого метода. В данной тестовой задаче при шаге $\Delta\eta = 0,01$ и предельной массе частицы (в функции распределения) $\Xi = 100$, количество элементов в векторах достигает $M + 1 = 10001$, что ограничивает расчетные возможности при дальнейшем увеличении диапазона масс.

В других работах [10, 11] для уменьшения количества точек расчета $M + 1$ пользуются переходом к новой функции $f(\xi, t) \rightarrow \varphi(j, t)$, где $j = 1 + \log_2(\xi/\xi_1)$. Это может повлиять на точность результатов (из-за необходимости аппроксимации функции $\varphi(j_c, t)$, где $j_c = j + \ln(1 - \eta/\xi) \ln \sqrt{2} \neq Z$, Z – целое число), однако позволяет находить распределение частиц в реальных условиях.

Соответственно, математические модели в физике облаков были также получены и решены как с помощью метода Бубнова–Галеркина [7], так и при использовании метода конечных разностей [12]. Кроме того, немало других работ посвящено задачам коагуляции, при рассмотрении кинетических уравнений решение также находят с помощью указанных численных методов и их модификаций [13–15].

Заключение

В данной работе рассмотрены и протестированы два метода: матрично-итерационный и метод Бубнова–Галеркина, на примере кинетического уравнения коагуляции (1)–(2) и его системы (3)–(4), для которых ранее было известно аналитическое решение (18), (19) [7].

Кратко изложены ключевые положения и алгоритм решения метода Бубнова–Галеркина для данных тестовых задач (1)–(2) и

(3)–(4) [7]. Также представлен разработанный алгоритм решения кинетического уравнения с использованием матрично-итерационного метода, который является модификацией метода конечных разностей [4, 8]. Численное решение, полученное этим методом, позволяет наглядно представить функцию распределения $f(\xi, t)$ в векторном виде F^n на каждом шаге итерации n .

Результаты численных экспериментов показывают, что оба метода могут быть эффективно применены для исследования трансформации микроструктурных характеристик однофазных и смешанных дисперсных систем с высокой точностью. Использование как матрично-итерационного метода, так и метода Бубнова–Галеркина в ходе компьютерного эксперимента, с учётом их особенностей при проведении вычислений, делает перспективным моделирование процессов формирования и развития облаков на основе полных моделей.

Список источников

1. Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Шаповалов В. А. Современное состояние и основные направления развития физики облаков и активных воздействий // Проблемы физики атмосферы, климатологии и мониторинга окружающей среды: Доклады IV Международной научной конференции (Ставрополь, 23–25 мая 2022 года). Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2022. С. 16–23.
2. Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Лесев В. Н., Шаповалов В. А. Результаты моделирования роли взаимодействия процессов в градовых облаках в формировании их макро- и микроструктурных характеристик // Доклады Всероссийской открытой конференции по исследованиям атмосферных и склоновых стихийных явлений в условиях современного изменения климата, посвященной 190-летию создания гидрометеорологической службы России и 90-летию Эльбрусской Высокогорной комплексной экспедиции АН СССР (Нальчик, 07–11 октября 2024 года). Нальчик: Издательская типография «Принт Центр», 2024. С. 18–21.
3. Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Шаповалов В. А. Некоторые результаты исследований роли взаимодействия про-

- цессов в конвективных облаках в формировании их макро- и микроструктурных характеристик // Системный синтез и прикладная синергетика: Сборник научных работ XI Всероссийской научной конференции (п. Нижний Архыз, 27 сентября – 1 октября 2022 года). Ростов-на-Дону – Таганрог: Южный федеральный университет, 2022. С. 310–314.
4. Марчук Г. И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1977. 352 с.
 5. Мезингер Ф., Аракава А. Численные методы, используемые в атмосферных моделях; пер. с англ. В. П. Садокова. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 134 с.
 6. Пененко В. В. Методы численного моделирования атмосферных процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 352 с.
 7. Калажоков Х. Х. Математическое моделирование облачных процессов. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2003. 166 с.
 8. Кольцова Э. М., Скичко А. С., Женса А. В. Численные методы решения уравнений математической физики и химии: учебное пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во Юрайт, 2024. 220 с.
 9. Птицын Н. В. Разностный метод интегрального преобразования изображения // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2005. № 3. С. 58–64.
 10. Ашабоков Б. А., Шаповалов А. В. Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии. Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2008. 254 с.
 11. Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Шаповалов А. В., Шаповалов В. А. Физика облаков и активных воздействий на них. Нальчик: Печатный двор, 2017. 240 с.
 12. Мазин И. П., Коган Е. Л., Сергеев Б. Н., Хворостьянов В. И. Численное моделирование облаков. М.: Гидрометеиздат, 1984. 185 с.
 13. Петров А. М. Моделирование физико-химических процессов образования и коагуляции частиц в смешанных облаках с учётом фазовых переходов: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 02.00.04 / Петров Александр Михайлович; [Место защиты: Науч.-исслед. физ.-хим. ин-т им. Л. Я. Карпова]. Саров, 2014. 20 с.
 14. Затевахин М. А., Игнатьев А. А., Рамаросон Р., Говоркова В. А. Численное исследование процесса коагуляции аэрозольных частиц в турбулентном пограничном слое атмос-

феры. // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2009. № 559. С. 161–191.

- 15 Пискунов В. Н., Гайнуллин К. Г., Петров А. М., Затевахин М. А., Станкова Е. Н. Моделирование кинетики формирования осадков в смешанном облаке // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 4. С. 438–447.

References

1. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Shapovalov VA. Current state and main directions of development of cloud physics and active influences. In Problems of atmospheric physics, climatology and environmental monitoring: Reports of the IV International Scientific Conference, Stavropol, May 23–25, 2022. Stavropol: North-Caucasus Federal University; 2022;16-23. (In Russ.).
2. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Lesev VN, Shapovalov VA. Results of modeling the role of interaction of processes in hail clouds in the formation of their macro- and microstructural characteristics. In Reports of the All-Russian Open Conference on the Study of Atmospheric and Slope Natural Phenomena in the Context of Modern Climate Change, Dedicated to the 190th Anniversary of the Establishment of the Hydrometeorological Service of Russia and the 90th Anniversary of the Elbrus High-Mountain Complex Expedition of the USSR Academy of Sciences, Nalchik, October 7–1, 2024. Nalchik: Print Center Publishing House; 2024;18-21. (In Russ.).
3. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Shapovalov VA. Some Results of Studies of the Role of Interaction of Processes in Convective Clouds in the Formation of Their Macro- and Microstructural Characteristics. In Systems Synthesis and Applied Synergetics: Collection of Scientific Papers of the XI All-Russian Scientific Conference, Nizhny Arkhyz, September 27 – October 01, 2022. Rostov-on-Don – Taganrog: Southern Federal University; 2022;310-314. (In Russ.).
4. Marchuk GI. Methods of computational mathematics. Moscow: Nauka; 1977. 352 p. (In Russ.).
5. Mesinger F, Arakawa A. Numerical methods used in atmospheric models; transl. from English by VP Sadokova. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1979. 134 p. (In Russ.).
6. Penenko VV. Methods of numerical modeling of atmospher-

- ic processes. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1981. 352 p. (In Russ.).
7. Kalazhokov HKh. Mathematical modeling of cloud processes. Nalchik: Publishing House of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 2003. 166 p. (In Russ.).
 8. Koltsova EM, Skichko AS, Zhensa AV. Numerical Methods for Solving Equations of Mathematical Physics and Chemistry: A Textbook for Universities. 2nd ed., corrected and supplemented. Moscow: Publishing House Yurait; 2024. 220 p. (In Russ.).
 9. Ptitsyn NV. Difference Method of Integral Image Transformation. Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series "Instrument Engineering". 2005;(3):58-64. (In Russ.).
 10. Ashabokov BA, Shapovalov AV. Convective Clouds: Numerical Models and Simulation Results in Natural Conditions and under Active Influence. Nalchik: Publishing House of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; 2008. 254 p. (In Russ.).
 11. Ashabokov BA, Fedchenko LM, Shapovalov AV, Shapovalov VA. Physics of Clouds and Active Impacts on Them. Nalchik: Pechatny Dvor; 2017. 240 p. (In Russ.).
 12. Mazin IP, Kogan EL, Sergeev BN, Khvorostyanov VI. Numerical Modeling of Clouds. Moscow: Gidrometeoizdat; 1984. 185 p. (In Russ.).
 13. Petrov AM. Modeling of Physicochemical Processes of Formation and Coagulation of Particles in Mixed Clouds Taking into Account Phase Transitions: abstract of dissertation of cand. phys. and math. sciences: 02.00.04. Petrov Alexander Mikhailovich; [Place of protection: Research Phys.-Chem. Institute named after LYa Karpov]. Sarov; 2014. 20 p. (In Russ.).
 14. Zatevakhin MA, Ignatiev AA, Ramaroson R, Govorkova VA. Numerical study of the process of coagulation of aerosol particles in the turbulent boundary layer of the atmosphere. Transactions of the Main Geophysical Observatory named after AI Voeikov. 2009;(559):161-191. (In Russ.).
 15. Piskunov VN, Gainullin KG, Petrov AM, Zatevakhin MA, et al. Modeling the kinetics of precipitation formation in a mixed cloud. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics of the Atmosphere and Ocean. 2022;58(4):438-447. (In Russ.).

Информация об авторах

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

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

Вклад авторов

Статья была написана в ходе научно-исследовательской деятельности аспиранта Игоря Сергеевича Афанасьева под руководством профессора Бориса Азреталиевича Ашабокова.

Information about the authors

Igor S. Afanasyev – Postgraduate Student, field of study 05.06.01 – Earth Sciences, 1.6.18 “Atmospheric and Climate Sciences”, High-Mountain Geophysical Institute, Researcher ID: AEO-9994-2022.

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

Contribution of the authors

The article was written during the research activities of Postgraduate Student Igor S. Afanasyev under the supervision of Professor Boris A. Ashabokov.



Научная статья

УДК 551.583

<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.6>

ПОВТОРЯЕМОСТЬ ЖАРКИХ ДНЕЙ НА СТАВРОПОЛЬЕ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

Юлия Леонтьевна Смерек^{1*},
Галина Хамзатовна Бадахова²,
Валентина Ивановна Волкова³,
Мариника Викторовна Барекова⁴

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

⁴ Высокогорный геофизический институт (д. 2, пр. Ленина, Нальчик, 360001, Российская Федерация)

¹ smerek@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3188-6089>

² badahovag@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-8136-2519>

³ stav.volkova@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7958-2941>

⁴ mbarekova@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-7959-5187>

* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

Жара относится к неблагоприятным явлениям погоды, так как представляет серьезную угрозу для многих отраслей народного хозяйства: сельского хозяйства, энергетики, строительства и др. Помимо этого, жара является метеопатогенным фактором, значительно ухудшая самочувствие метеозависимых людей, людей с сердечно-сосудистыми и другими заболеваниями [1, 6]. Таким образом, исследование климатического режима жары является важным аспектом при организации различных сфер жизнедеятельности человека. Информационной базой для анализа пространственно-временного распределения жарких дней на территории региона явились данные наблюдений 16 метеостанций Ставропольского края за 1971–2024 гг., данные Справочника по климату СССР [10] и монографии «Ставропольский край: современные климатические условия» [3]. Исследования проводились методами физико-статистического и регрессионного анализа. Для всех метеорологических станций Ставропольского края рассчитаны осредненные значения повторяемости жарких дней (в том числе и очень жарких дней, а также жары как опасного явления) за прошедшие годы нового века: годовое, сезонное и месячное число жарких дней, а также повторяемость и средняя продолжительность длительных периодов жары. Определены экстремальные значения указанных характеристик. По результатам сравнительного анализа полученных данных с данными за различные многолетние периоды XX века дана характеристика

доминирующей тенденции в многолетних изменениях повторяемости жарких дней. Показано, что распределение жарких дней в Ставропольском крае достаточно хорошо соотносится с его ландшафтной структурой [12]. В полупустынной и сухостепной зонах края ежегодно фиксируется около 80 жарких дней, в степной зоне территории 60–70 дней, в лесостепной — 40–55 дней, в среднегорной зоне — около 10 дней. В среднем за год отмечается около 30 дней с сильной жарой в полупустынных и сухостепных ландшафтах, около 20 дней в степных, около 10 дней в лесостепных ландшафтах, около 5 дней в низкогорной зоне, крайне редко — в среднегорье. Жара как опасное явление зафиксировано на всей территории края, кроме низкогорной и среднегорной зоны. На всей территории края четко прослеживается: увеличение годового и летнего числа жарких и очень жарких дней; возрастание повторяемости жары уровня опасного явления; увеличение повторяемости длительных периодов жары.

Ключевые слова: температура воздуха, жара, период, опасное явление

Для цитирования: Смерек Ю. Л., Бадахова Г. Х., Волкова В. И., Барекова М. В. Повторяемость жарких дней на Ставрополье в условиях современного климата // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 2. С. 135–152. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.6>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 05.05.2025;
одобрена после рецензирования 06.06.2025;
принята к публикации 20.06.2025.

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

Recurrence of hot days in the Stavropol krai under current climate conditions

Yulia L. Smerek^{1*},
Galina Kh. Badakhova²,
Valentina I. Volkova³,
Marinika V. Barekova⁴

^{1, 2, 3} North-Caucasus Federal University (1, Pushkin St., Stavropol, 355017, Russian Federation)
⁴ High-Mountain Geophysical Institute of Roshydromet (2, Lenin Ave., Na-
Ichik, 360001, Russian Federation)
¹ smerek@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3188-6089>
² badahovag@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0008-8136-2519>
³ stav.volkova@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7958-2941>
⁴ mbarekova@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-7959-5187>
* Corresponding author

Abstract.

Heat is an unfavorable weather phenomenon, as it poses a serious threat to many sectors of the national economy: agriculture, energy, construction, etc. In addition, heat is a meteorological factor, significantly worsening the well-being of weather-sensitive people, people with cardiovascular and other diseases [1, 6]. Thus, the study of the climatic regime of heat is an important aspect in organizing various spheres of human activity. The information base for the analysis of the spatial and temporal distribution of hot days in the region was the observation data of 16 meteorological stations of the Stavropol Krai for 1971–2024, data from the Handbook of the USSR Climate [10] and the monograph Stavropol Krai: Modern Climatic Conditions [3]. The research was carried out using the methods of physical-statistical and regression analysis. For all meteorological stations of the Stavropol Region, the averaged main characteristics of the hot regime for the first 24 years of the new century are calculated: the annual, seasonal and monthly number of hot days and their total duration in the indicated periods. The extreme values of the specified characteristics are determined. The analysis of the annual course of the main characteristics of heat has been carried out. Based on the results of a comparative analysis of the obtained data with data for different long-term periods of the 20th century, a characteristic is given of the dominant trend in long-term changes in the frequency and duration of heat. It is shown that the distribution of hot days in the Stavropol Krai correlates quite well with its landscape structure [12]. In the semi-desert and dry steppe zones of the Krai, about 80 hot days are recorded annually, in the steppe zone of the territory — 60–70 days, in the forest-steppe — 40–55 days, in the mid-mountain zone — about 10 days. On average, about 30 days with extreme heat are observed per year in semi-desert and dry steppe landscapes, about 20 days in steppe, about 10 days in forest-steppe landscapes, about 5 days in the low-mountain zone, and extremely rarely in the mid-mountain zone. Heat as a dangerous phenomenon is recorded throughout the territory of the Krai, except for the low-mountain and mid-mountain zones. Throughout the territory of the Krai, the following is clearly visible: an increase in the annual and summer number of hot and very hot days; an increase in the frequency of heat of the level of a dangerous phenomenon; an increase in the frequency of long periods of heat.

Keywords:

temperature of air, heat, period, dangerous condition

For citation:

Smerek YuL, Badakhova GK, Volkova VI, Barekova MV. Recurrence of hot days in the Stavropol Krai under current climate conditions. Science. Innovations. Technologies. 2025;(2):135-152 (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.6>

Conflict of interest:

the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 05.05.2025;
approved after reviewing 06.06.2025;
accepted for publication 20.06.2025.

Введение

Жара относится к неблагоприятным явлениям погоды, так как представляет серьезную угрозу для многих отраслей народного хозяйства: сельского хозяйства, энергетики, строительства и др. Помимо этого жара является метеопатогенным фактором, значительно ухудшая самочувствие метеозависимых людей, людей с сердечно-сосудистыми и другими заболеваниями [1, 6]. Таким образом, исследование климатического режима жары является важным аспектом при организации различных сфер жизнедеятельности человека.

Материалы и методы исследований

Основной информационной базой для исследования режима жары в различных ландшафтах Центрального Предкавказья явились эксклюзивные данные наблюдений 16 метеорологических станций Ставропольского ЦГМС за 1971–2024 годы, материалы Справочника по климату СССР [10], содержащего осредненные данные до 1960-х годов, и материалы монографии «Ставропольский край: современные климатические условия» [3], написанной на основе данных метеостанций Ставропольского края за 1961–2000 годы. Первичная обработка данных метеонаблюдений осуществлялась при помощи специальной программы PERSONA-MISS, дальнейшая обработка проводилась посредством программы CLICOM. Климатологический анализ обработанных данных проводился стандартными методами математической статистики, принятыми в климатологии.

Результаты исследований и их обсуждение

Благодаря значительной расчлененности рельефа и большому перепаду высот на территории Ставропольского края сформировались самые разнообразные ландшафты, от равнинных полупустынь до среднегорных альпийских лугов [12]. Хотя климатические характеристики разных ландшафтов существенно отличаются, поле температуры воздуха является относительно устойчивым и однородным. На всей территории края наблюдается повышение средних годовых, сезонных и месячных температур воздуха. На фоне общего потепления меняется и повторяемость жарких дней. В работе проведен анализ характеристик повторяемости жарких дней в Ставропольском крае, позволяющий с некоторым приближением создать целостную картину режима жары на территории края.

Жара

Жаркие дни — это дни с максимальной температурой воздуха 30 °C и выше. Они отмечаются только в теплый период года, за исключением уникального случая жары 24 и 25 марта 2008 года. 24 марта 2008 года воздух прогрелся до 30 °C в Ессентуках и Пятигорске и до 30,3 °C в Минеральных Водах. 25 марта 2008 года на западе края были зафиксированы температуры от 30,2 °C в Ставрополе до 32,1 °C в Новоалександровске. Следует отметить, что в текущем, 2025 году, не входящем в анализируемый ряд, на 7 метеостанциях 16 марта были зафиксированы значения температуры воздуха от 30 °C в Минеральных Водах до 31,2 °C в Светлограде и Новоалександровске.

В среднем по краю среднее годовое число дней с максимальной температурой воздуха 30 °C и выше достаточно велико: в полупустынной зоне — 79 дней, в степной — 72 дня, в лесостепной — 54 дня. Метеостанция Ставрополь, находящаяся на высоте 451 м над уровнем моря, фиксирует ежегодно в среднем 37 жарких дней, а в Кисловодске, на высоте 934 м, в среднем за год бывает лишь 10 жарких дней. Кисловодск — единственная метеостанция, где жара бывает не ежегодно. Так, жарких дней здесь не было в 2002, 2004, 2009 и 2013 гг. (табл. 1).

В первом месяце теплого периода года жара бывает крайне редко. Всего по краю за 2001–2024 гг. было 17 жарких апрельских дней: 2 дня в 2004, и по одному дню в 2004, 2005, 2013 и 2018 гг., 2 дня в 2022 году и 11 дней в аномально жарком апреле 2024 года. На метеостанциях зафиксировано от 1 до 4 жарких дней за 24 года. Во всем крае абсолютные максимумы апрельских температур превышают 30 °C, наибольшее его значение составляет 34,0 °C (Невинномысск, 12.04.2004).

В последнем месяце теплого периода жарких дней было примерно столько же, как и в апреле: 18 дней за 24 года. Из 24 прошедших октябрей, жаркие дни фиксировались только в 10: 5 дней в 2003 году, в остальных — по 1–2 дня. Октябрьский максимум температуры воздуха составил 32,1 °C (Невинномысск, Новоалександровск, 05.10.2019). В Невинномысске и Новоалександровске за 24 года было по 8 жарких дней в октябре, в Минеральных Водах — 6 дней, в Светлограде — 5, на остальных станциях — по 1–2 жарких дня за

Таблица 1. СРЕДНЕЕ ЧИСЛО ДНЕЙ С МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОЗДУХА 30 °С И ВЫШЕ
Table 1. Average number of days with maximum air temperature of 30 °C and above

Станция	V	VI	VII	VIII	IX	За год
Александровское	1	10	20	21	4	56
Арзгир	4	16	26	25	5	76
Благодарный	3	15	25	24	5	72
Буденновск	3	17	26	26	6	78
Георгиевск	2	12	23	22	5	64
Дивное	5	16	25	25	6	77
Зеленокумск	4	16	25	25	6	76
Изобильный	2	9	19	20	4	54
Кисловодск	*	1	3	5	1	10
Красногвардейское	3	14	25	24	6	72
Минеральные Воды	1	10	20	21	5	57
Невинномысск	1	8	19	19	4	51
Новоалександровск	3	13	23	23	6	68
Рощино	4	19	27	26	7	83
Светлоград	3	14	24	24	6	71
Ставрополь	1	5	13	15	3	37

24 года. Наиболее поздний жаркий день в октябре — это 14 октября 2020 г. (Кисловодск, 30,3 °C).

На апрель и октябрь суммарно приходится менее 0,5 % среднего годового числа жарких дней. Таким образом, жаркие дни в основном фиксируются с мая по сентябрь.

В мае жаркие дни бывают не каждый год. Не было жарких дней на Ставрополье в мае 2001, 2009, 2011, 2011, 2016, 2017 годов. Реже всего майская жара отмечается в Кисловодске (3 года из 24) и Ставрополе (8 лет).

Большая часть жарких дней, естественно, приходится на лето. В Кисловодске на лето приходится 80 % от годового числа жарких дней, на остальных станциях — от 86 % в Георгиевске до 91 % в Александровском.

В июне жаркие дни бывают ежегодно везде, кроме Александровского, Ставрополя и Кисловодска. В Кисловодске лишь в 8 годах нового века были зафиксированы жаркие дни (13 дней).

Таблица 2. НАИБОЛЬШЕЕ ЧИСЛО ДНЕЙ С МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ
ВОЗДУХА 30 °С И ВЫШЕ
Table 2. Mavimum number of days with maximum air temperature of 30 °C
and above

Станция	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	За год
Александровское	0	4	10	23	31	30	15	1	87
Арзгир	0	1	15	29	31	31	16	1	95
Благодарный	0	4	12	25	31	31	17	1	103
Буденновск	0	1	11	29	31	31	18	1	97
Георгиевск	0	2	11	25	29	31	16	1	91
Дивное	0	2	14	28	31	30	14	2	98
Зеленокумск	0	1	12	27	31	31	18	2	98
Изобильный	1	3	10	24	30	28	14	1	84
Кисловодск	0	1	3	3	10	16	9	1	24
Красногвардейское	1	3	11	28	31	30	17	2	98
Минеральные Воды	1	5	10	25	31	30	17	2	85
Невинномысск	1	4	9	25	28	30	17	2	80
Новоалександровск	1	4	12	27	30	30	17	2	96
Рощино	0	2	14	29	31	31	18	1	101
Светлоград	0	5	11	26	31	30	16	2	96
Ставрополь	1	1	10	19	25	28	12	1	68

В июле и августе жаркие дни ежегодно фиксируются на всей территории края, кроме среднегорной зоны (в Кисловодске в 9 годах в июле и 8 годах в августе столбик термометра так и не дошел до отметки 30 °С). Самый жаркий месяц года пока еще июль, но мощное потепление августа привело к тому, что в среднем за 24 года на 6 станциях жарких дней в августе столько же, сколько и в июле, а на 5 станциях в августе их даже несколько больше.

В сентябре не было жарких дней в 13 годах в Кисловодске, в 8 годах в Ставрополе, в 3 — в Невинномысске, в 2 — в Александровском. На всех остальных метеостанциях не было зафиксировано жарких дней лишь в сентябре 2013 года.

Фактическое месячное и годовое количество жарких дней колеблется от года к году, но в целом в крае (кроме Кисловодска) размах колебаний не очень велик (табл. 2). В среднем наибольшие значения превосходят средние в 1,4 раза, а наименьшие составляют 0,6 от среднего. Наименьшая вариативность отмечается в Рощино (1,2

и 0,8 соответственно), наибольшая — в Ставрополе (1,8 и 0,3). Каждая метеостанция ежегодно фиксирует 1–2 длительных (10 дней и более) непрерывных периода с ежедневным прогревом воздуха до 30 °С и выше. За 24 года нового века таких периодов отмечено от 17 в Ставрополе до 44 в Дивном. Конечно, особняком стоит Кисловодск, в котором за эти годы длительные периоды жары были зафиксированы лишь дважды (11-дневные периоды в 2001 и 2010 гг.). Наибольшая продолжительность непрерывного периода ежедневной жары составляет 73 дня (Арзгир, 19 июня — 28 августа 2010 г.)

Периоды ежедневной жары продолжительностью 20 дней и более зафиксированы на всей территории края, кроме Кисловодска.

Жаркие периоды длительностью не менее 30 дней подряд зафиксированы на всей территории края, кроме Ставрополя и Кисловодска. Чаще всего так долго жара стоит в восточной половине края. Больше всего таких периодов — по 11 — в Буденновске и в Рощино; несколько меньше — по 9 — в Арзгире, и Светлограде, по 8 в Дивном и Зеленокумске.

Сильная жара

К сильной жаре относится температура воздуха 35 °С и выше. За рассматриваемые 24 года сильная жара отмечалась только в период июнь–сентябрь. За эти 4 месяца отмечается от 4 очень жарких дней в Ставрополе до 28 дней в Дивном (табл. 3).

В Кисловодске сильная жара за 20 лет была зафиксирована дважды: по одному дню в сентябре 2010 и в августе 2015 г. Поэтому в дальнейшем анализе повторяемости сильной жары Кисловодск не рассматривается. В Ставрополе не было сильной жары в 2002, 2004 и 2013 гг. В восточных районах края сильная жара отмечалась ежегодно, на остальной территории не было сильной жары только в 2004 году.

Очень сильная жара бывает в основном в июле и августе. Однако в сентябре тоже бывает очень жарко, притом одновременно на всей территории края. Так, в сентябре 2015 г. везде, кроме Кисловодска было зафиксировано от 3 до 5 очень жарких дней, причем по 5 дней было отмечено на половине станций. Очень примечательным было 1 сентября 2010 г., когда на всей территории края воздух

Таблица 3. СРЕДНЕЕ ЧИСЛО ДНЕЙ С МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОЗДУХА 35 °C И ВЫШЕ
Table 3. Average number of days with maximum air temperature of 35 °C and above

Станция	V	VI	VII	VIII	IX	За год
Александровское	0	1	5	5	*	11
Арзгир	*	5	11	11	1	28
Благодарный	*	3	9	9	1	22
Буденновск	*	4	10	11	1	26
Георгиевск	*	2	6	7	1	16
Дивное	*	5	11	11	1	28
Зеленокумск	*	4	10	10	1	25
Изобильный	0	1	5	5	*	11
Кисловодск	0	0	*	*	*	*
Красногвардейское	*	3	10	10	1	24
Минеральные Воды	*	1	5	5	1	12
Невинномысск	0	1	4	4	*	9
Новоалександровск	*	2	9	8	1	20
Рощино	1	5	11	12	1	30
Светлоград	*	3	9	9	1	22
Ставрополь	*	*	2	3	*	5

прогрелся выше 36 °C, а в Красногвардейском и Дивном температура поднялась выше 40 °C. На ряде станций это был самый жаркий день года.

Наибольшее годовое число дней варьирует от 17 в Ставрополе (2010) до 53 в Рощино (2007), в 2–3 раза превосходя среднее значение (табл. 4).

Всеми метеостанциями, кроме Кисловодска, были зафиксированы относительно продолжительные (5 дней и более) периоды ежедневной сильной жары. Ежегодно они бывают только в восточной зоне края, на остальной территории — в среднем один раз в 2–3 года. За 24 года таких периодов зафиксировано от 8 в Ставрополе до 40 в Рощино. Средняя продолжительность одного периода — 6–8

Таблица 4. НАИБОЛЬШЕЕ ЧИСЛО ДНЕЙ С МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ ВОЗДУХА 35 °С И ВЫШЕ
Table 4. Maximum number of days with maximum air temperature of 35 °C and above

Станция	V	VI	VII	VIII	IX	За год
Александровское	0	4	14	18	3	29
Арзгир	4	16	21	28	5	52
Благодарный	4	10	19	23	5	41
Буденновск	3	11	17	23	4	49
Георгиевск	1	8	15	21	5	26
Дивное	6	16	19	24	5	58
Зеленокумск	2	12	20	23	5	40
Изобильный	0	6	15	18	3	31
Кисловодск	0	0	1	1	1	2
Красногвардейское	3	13	17	23	5	47
Минеральные Воды	1	7	16	16	5	22
Невинномысск	0	4	14	19	3	21
Новоалександровск	2	11	17	18	6	37
Рощино	6	15	20	25	5	53
Светлоград	3	10	17	21	4	43
Ставрополь	1	2	7	14	3	17

дней. Иногда сильная жара стоит в течение 10 и более дней. Такие длительные периоды сильной жары бывают очень редко. За 24 года они были зафиксированы по 6–9 раз метеостанциями в восточной половине края и 1–3 раза — остальными метеостанциями. Самый долгий период ежедневной сильной жары зафиксирован в период с 25 июля по 17 августа 2010 года и составил 24 дня (Рощино), а на остальной территории от 12 до 23 дней.

Жара как опасное явление

В отдельные годы максимальная суточная температура воздуха достигает критических значений. Согласно перечню опасных гидрометеорологических и гелиофизических явлений

[9], опасным явлением считается повышение максимальной суточной температуры до 40 °С. Однако такие дни даже в самых жарких районах края бывают не ежегодно. В новом веке не было опасной жары в 2002, 2004, 2009, 2013 и 2019 годах. В остальные годы чаще всего фиксировалось 1–4 дня с опасной жарой, в 2011 году — 5 дней, в 2021 — 7 дней, в 2017 — 8 дней. Больше всего опасно жарких дней — 17 — было в 2010 году. Всего за 24 года нового века было зафиксировано 74 календарных дня с максимальной суточной температурой 40 °С и выше.

Помесячное распределение жарких дней крайне неравномерно. Так, в июне опасная жара отмечалась лишь в 2012 (1 день) и 2018 (2 дня) годах. В июле жара отмечалась в 12 из прошедших 24 летних периодов, в августе — в 11. При этом в июле было отмечено 34 дня с опасной жарой, в августе — 36 дней. В сентябре за все годы зафиксирован только один день с опасной жарой: 1 сентября 2010 года на севере края метеостанциями Красногвардейское и Дивное были зафиксированы температуры 40,9 °С и 40,1 °С соответственно.

В отдельные годы опасная жара отмечается в течение нескольких дней подряд. Так, в 2011 году очень сильная жара стояла пять дней подряд, с 27 по 31 июля. Всего в эти дни жара как опасное явление была зафиксирована на 12 метеостанциях — это наибольшая территория, охваченная чрезвычайно сильной жарой одновременно. При этом 30 июля были обновлены температурные рекорды на 8 метеостанциях края, а в Дивном был зафиксирован абсолютный максимум температуры воздуха в крае, составивший 44,0 °С.

Также на довольно большой территории зафиксирован трехдневный период опасной жары в 2021 году: 20–22 июля ее отметили 6 метеостанций.

Наибольшее месячное число дней с опасной жарой и наиболее длительный период опасной жары на одной станции был зафиксирован в Дивном в августе 2010 года. За месяц здесь было 11 дней с температурой воздуха более 40 °С, разделенные на 7-дневный (1–7 августа) и 4-дневный (9–12 августа) периоды ежедневной опасной жары, причем разделены они были одним днем с температурой 39,9 °С.

Анализ повторяемости сильной жары как опасного явления показал, что за первые 24 года нового века по-прежнему ни разу не зафиксирована температура воздуха 40 °С в Кисловодске и Ставро-

Таблица 5. СУММАРНОЕ ЧИСЛО ДНЕЙ С ОПАСНОЙ ЖАРОЙ И АБСОЛЮТНЫЕ МАКСИМУМЫ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА
Table 5. Total number of days with dangerous heat and absolute maximum air temperatures

Станция	1951–2000	2001–2024	Абс. макс.	Дата макс.
Александровское	0	2	41,1	30.07.2011
Арзгир	17	34	43,4	30.07.2011
Благодарный	9	19	42,2	30.07.2011
Буденновск	6	28	43,8	30.07.2011
Георгиевск	0	11	41,6	21.07.2021
Дивное	25	52	44,0	30.07.2011
Зеленокумск	4	26	42,7	21.07.2021
Изобильный	0	3	41,3	30.07.2011
Кисловодск	0	0	36,2	31.07.2000
Красногвардейское	18	25	42,8	01.08.2015
Минеральные Воды	0	2	40,9	08.08.2006
Невинномысск	0	3	41,0	08.08.2006
Новоалександровск	6	10	42,4	31.07.2015
Рощино	8	32	42,5	30.07.2011
Светлоград	5	19	43,8	30.07.2011
Ставрополь	0	0	39,7	08.08.2006

поле, на пяти метеостанциях края она была зафиксирована впервые. Но главное — это то, что на всей территории края число дней с опасной жарой за последние 24 года оказалось значительно больше, чем за предыдущие 50 лет, что однозначно свидетельствует о тенденции увеличения повторяемости и распространенности опасной жары (табл. 5).

Изменение режима жары

Для оценки изменения повторяемости жарких дней сравним современные данными с аналогичными данными за некоторые многолетние периоды XX века [3, 10]. Сравнение с данными за 1961–2000 гг. показало, что среднее годовое число жарких дней в Кисловодске увеличилось на 7 дней (10 против 3 дней во второй

половине XX века), на 16 дней в Арзгире, на 18 дней в Ставрополе, на остальной территории края на 20–25 дней, а в Георгиевске на 36 дней.

В 2008 и 2025 годах отмечены жаркие дни в марте, чего не было, по крайней мере, с середины XX века. Этот факт хорошо согласуется с ранее полученными результатами о тенденции более раннего наступления метеорологической весны и смещении границ времен года [4].

За последние 30 лет XX века жара в апреле была зафиксирована только в трех годах: 1975, 1982 и 1998. В 1998 году жарой был охвачен весь край, даже в Ставрополе и Кисловодске столбик термометра поднялся до 31,8 и 31,9 °С соответственно. При этом на 4 метеостанциях в западной части края была зафиксирована очень сильная жара, с максимумом 36,8 °С. За первые 24 года XXI века жаркие дни в апреле были зафиксированы в 6 годах, но максимальные температуры были ниже максимумов XX века. Однако в новом веке отмечены периоды ежедневной жары в апреле, чего не было в XX веке.

Повторяемость жарких дней в мае возросла практически вдвое по сравнению со второй половиной XX века. Отмечены даже длительные периоды ежедневной жары, как, например, в 2007 году, когда от 11 до 14 дней подряд стояла жара на всей территории края, кроме среднегорных районов и наиболее высокой части Ставропольской возвышенности.

Число летних жарких дней увеличилось на 5 дней в среднем по краю и на 15–20 дней на остальной территории края. Максимальные значения температуры воздуха в летний период и в сентябре были существенно выше абсолютных максимумов прошлого века. На всех метеостанциях края рекордная жара зафиксирована в XXI веке (см. табл. 5). Значительно увеличилось число многодневных периодов жаркой и очень жаркой погоды.

В октябре жаркие дни в новом веке фиксировались значительно чаще: за последние 30 лет XX века они зафиксированы в 7 годах, а за 24 года XXI века — в 10 годах. Следует, однако, отметить, что в 1998 и 1999 гг. максимумы температуры воздуха достигли уровня сильной жары: 35,2 °С и 36,1 °С в Красногвардейском и 36,0 °С и

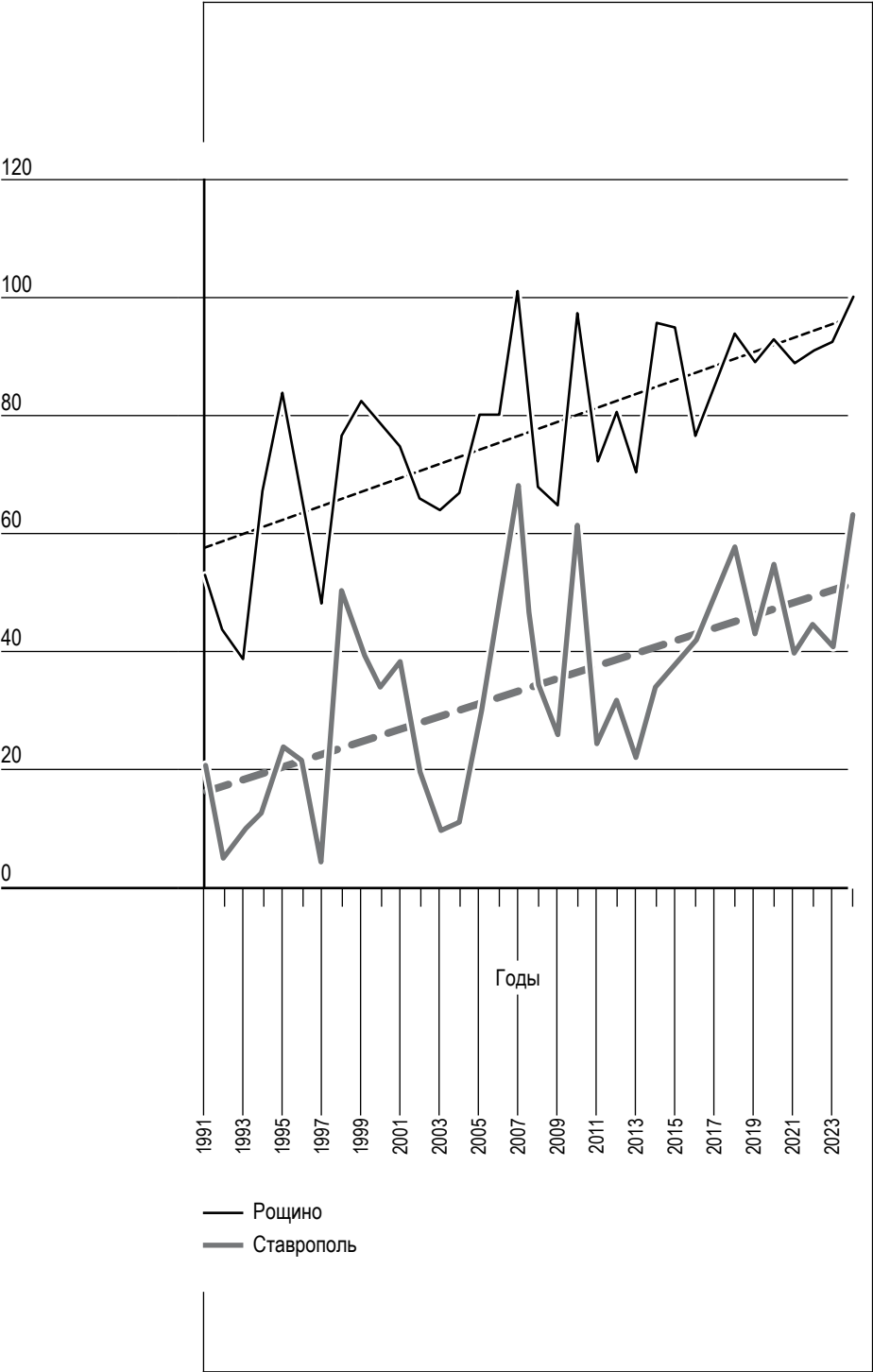


Рис. Многолетний ход годового числа жарких дней.
Fig. Long-term variation of the annual hot days number.

36,3 °C в Новоалександровске соответственно, а в новом веке в октябре сильной жары не зафиксировано. Таким образом, мы видим, что повторяемость лет с жарой в апреле практически не изменилась, в октябре – возросла, но абсолютные максимумы температуры воздуха в обоих месяцах в прошлом веке выше, чем в нынешнем.

Рассмотрение повторяемости жарких и очень жарких дней по периодам нового века показывает, что на всей территории края годовое число жарких и очень жарких дней в 2011–2020 гг. заметно больше, чем в 2001–2010 гг. Среднее годовое число жарких и очень жарких дней в 2021–2024 гг. повсеместно выше, чем в 2011–2020 гг. Таким образом, можно сделать однозначный вывод о том, что климат Ставропольского края становится все более жарким (см. рис.).

Заключение

Для всех метеорологических станций Центрального Предкавказья рассчитаны основные характеристики жарких дней за прошедшие 24 года нового века: среднее годовое, сезонное и месячное число дней с жарой, сильной жарой и жарой как опасное явление; среднее число и продолжительность длительных непрерывных периодов жары; определены экстремальные значения указанных характеристик. Проведен анализ многолетнего хода годового числа жарких дней в различных ландшафтах края.

По результатам сравнительного анализа полученных данных с данными за различные периоды XX века установлено, что на всей территории края имеет место ярко выраженная тенденция увеличения повторяемости жарких и очень жарких дней, а также жары как опасного явления.

Анализ повторяемости сильной жары как опасного явления показал, что общее число дней с сильной жарой за последние 24 года оказалось больше, чем за предыдущие 50 лет, и это однозначно свидетельствует о тенденции возрастания повторяемости сильной жары как опасного явления. Такие изменения температуры стали причиной учащения засух и суховеев [8], уменьшения количества эффективных осадков [5, 7], ухудшения условий для растениеводства и пастбищного животноводства [11], ухудшения общей экологической обстановки, особенно на востоке края [2].

Список источников

1. Ассман Д. Чувствительность человека к погоде. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 248 с.
2. Бадахова Г. Х., Каплан Г. Л., Кравченко Н. А. Экологические последствия современных изменений климата на примере Ставропольского края // Охрана атмосферного воздуха. Атмосфера. 2011. № 4. С. 51–55.
3. Бадахова Г. Х., Кнутас А. В. Ставропольский край: современные климатические условия. Ставрополь: Краевые сети связи, 2007.
4. Волкова В. И., Бадахова Г. Х., Барекова М. В., Каплан Г. Л. Особенности атмосферной циркуляции переходного периода и колебания дат начала весны в Центральном Предкавказье // Наука. Инновации. Технологии. 2021. № 4. С. 125–138.
5. Волкова В. И., Бадахова Г. Х., Кравченко Н. А., Каплан Г. Л. Динамика и современный температурный режим календарного лета на Ставропольской возвышенности // Наука. Инновации. Технологии. 2020. № 4. С. 149–160.
6. Исаев А. А. Экологическая климатология. М.: Научный мир, 2001.
7. Каплан Г. Л. Исследование современных изменений регионального климата и их влияния на ландшафты Ставропольского края: диссертация канд. географ. наук, Высокогорный геофизический институт. Нальчик, 2010. 180 с.
8. Каплан Г. Л., Бадахова Г. Х., Барекова М. В., Кравченко Н. А. Условия формирования засух как опасного явления в Ставропольском крае // Доклады Всероссийской открытой конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидромет. процессы. Нальчик: Принт-Центр, 2021. С. 173–178.
9. Порядок действий организаций и учреждений Росгидромета при возникновении опасных природных (гидрометеорологических и гелиофизических) явлений. СПб: Гидрометеиздат, 2000. С. 21–23.
10. Справочник по климату СССР. Вып. 13. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 422 с.
11. Чирков Ю. И. Агрометеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1986. С. 211–212.
12. Шальнев В. А. Эволюция ландшафтов Северного Кавказа. Ставрополь: Изд-во СГУ, 2007. 310 с.

References

1. Assman D. Man sensitivity to weather. Gidrometeoizdat; Leningrad. 1966. 248 p. (In Russ).
2. Badakhova GKh, Kaplan GL, Kravchenko NA. Ecological consequences of modern climate change on the example of the Stavropol Territory. Okhrana atmosfernogo vozdukha. Atmosfera = Protection of atmospheric air. Atmosphere. 2011;(4):51-55. (In Russ).
3. Badakhova GKh, Knutas AV. Stavropol Territory: modern climatic conditions. Stavropol: Regional communications network publishers; 2007. (In Russ).
4. Volkova VI, Badakhova GKh, Barekova MV, Kaplan GL. Atmospheric circulation features transitional period features and variations of springbeginning dates in the Central Ciscaucasia. Science. Innovations. Technologies. 2021;(4):125-138. (In Russ).
5. Volkova VI, Badakhova GKh, Kravchenko NA, Kaplan GL. Dynamics and modern temperature regime of calendar summer over Stavropol Height. Science. Innovations. Technologies. 2020;(4):149-160. (In Russ).
6. Isaev AA. Ecological climatology. Moscow: Scientific world; 2001. (In Russ).
7. Kaplan GL. Research of modern changes of a regional climate and their influence on landscapes of Stavropol Territory: dissertation of cand. geogr. Sciences. High-mountainous geophysical institute. Nalchik; 2010. 180 p. (In Russ).
8. Kaplan GL, Badakhova GKh, Barekova MV, Kravchenko NA. Conditions for the formation of droughts as a dangerous phenomenon in the Stavropol Territory. In Reports of the All-Russian open conf. on cloud physics and active impacts on hydrometeorological processes. Nalchik: Print Center; 2021;173–178. (In Russ).
9. Procedure for actions of organizations and institutions of Roshydromet in the event of dangerous natural (hydrometeorological and heliophysical) phenomena. St. Petersburg: Gidrometeoizdat; 2000. P. 21-23. (In Russ).
10. Handbook on the Climate of the USSR. Vol. 13. Part 2. Temperature of Air and Soil. L.: Hydrometeoizdat; 1966. (In Russ).
11. Chirkov Yul. Agrometeorology. L.: Gidrometeoizdat; 1986. P. 211–212. (In Russ).
12. Shalnev VA. Evolution of the landscapes of the North Caucasus. Stavropol: SSU Publishing House; 2007. (In Russ).

Информация об авторах

Юлия Леонтьевна Смерек – кандидат физико-математических наук, доцент, Северо-Кавказский федеральный университет.

Галина Хамзатовна Бадахова – доцент, Северо-Кавказский федеральный университет.

Валентина Ивановна Волкова – кандидат физико-математических наук, доцент, декан физико-технического факультета Северо-Кавказского федерального университета.

Мариника Викторовна Барекова – кандидат физико-математических наук, ученый секретарь Высокогорного геофизического института.

Вклад авторов

Юлия Леонтьевна Смерек. Обработка и статистический анализ фактических данных наблюдений, сравнительный анализ физических процессов, рассмотренных в статье.

Галина Хамзатовна Бадахова. Аналитический обзор, описание, характеристика и сравнительный анализ физических процессов, рассмотренных в статье.

Валентина Ивановна Волкова. Сравнительный анализ данных фактических наблюдений, редакционные правки.

Мариника Викторовна Барекова. Сравнительный анализ данных фактических наблюдений, редакционные правки.

Information about the authors

Yulia L. Smerek – Cand. Sci. (Phys.-Math), Associate Professor, North-Caucasus Federal University.

Galina Kh. Badakhova – Associate Professor, North-Caucasus Federal University.

Valentina I. Volkova – Cand. Sci. (Phys.-Math), Associate Professor, Head of Physical-technical Department, North-Caucasus Federal University.

Marinika V. Barekova – Cand. Sci. (Phys.-Math), Science Secretary, High-Mountain Geophysical Institute.

Contribution of the authors

Yulia L. Smerek. Processing and statistical analysis of factual data, comparative analysis of physical processes, analysis in the article.

Galina Kh. Badakhova. Analytical review, description, characteristics and comparative analysis of the physical processes discussed in the article.

Valentina I. Volkova. Comparative analysis of actual observation data, editorial corrections.

Marinika V. Barekova. Comparative analysis of actual observation data, editorial corrections.



Научная статья
УДК 622.276.031:550.822.3
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.7>

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ НА УПРУГИЕ СВОЙСТВА ГОРНОЙ ПОРОДЫ

Василий Сергеевич Кулешов¹,
Богдан Николаевич Недомовный^{2*},
Алексей Юрьевич Кудымов³,
Николай Александрович Распутин⁴,
Наталья Юрьевна Юрьева⁵

- ¹ РН-Технологии (д. 1, б-р Раменский, Москва, 119607, Российская Федерация)
^{2,3} Тюменский нефтяной научный центр (д. 42, ул. Максима Горького, Тюмень, 625000, Российская Федерация)
^{4,5} РОСПАН ИНТЕРНЕТНЛ (д. 16В, ул. Геологоразведчиков, Новый Уренгой, 629306, Российская Федерация)
¹ vskuleshov@rosneft.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7542-0518>
² bnnedomovnyi@tnnc.rosneft.ru; <https://orcid.org/0009-0007-8614-4118>
³ aykudymov@tnnc.rosneft.ru; <https://orcid.org/0009-0001-2432-4419>
⁴ narasputin@rspn.rosneft.ru; <https://orcid.org/0009-0004-4938-3580>
⁵ nyepifantseva@rspn.rosneft.ru; <https://orcid.org/0009-0007-7355-5428>
* Автор, ответственный за переписку

Аннотация.

С ростом интереса к трудно извлекаемым запасам углеводородов возникает необходимость повышения детальности моделирования массива горных пород и пласта коллектора. Учёт механической анизотропии среды, в частности вызванной прослаиванием тонких пропластков, позволит получить более полную картину о напряжённо-деформированном состоянии как самого пласта коллектора, так и барьеров/перемычек, что в свою очередь открывает дополнительные возможности для оптимизации процессов разработки месторождений, оптимизации и повышения эффективности ГРП, а также бурения скважин. В рамках настоящей работы описана технология проведения лабораторных исследований кернового материала для изучения анизотропии упругих свойств. На основании результатов которых были получены корреляционные зависимости для упругих характеристик пород Сортымской, Баженовской и Абалакской свит. На примере одного из месторождений Западной Сибири демонстрируются результаты построения двух видов геомеханических моделей (изотропной и анизотропной). По результатам сопоставления значений «минимального горизонтального напряжения» и «градиента начала поглощений» показано,

что анизотропия упругих свойств оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние массива горных пород. Использование изотропных моделей для анизотропных сред приводит к существенному занижению горизонтальных напряжений/градиентов начала поглощений, что в свою очередь, не позволяет раскрыть потенциал ГРП, а также выбрать оптимальный интервал глубин спуска обсадных колон, что критически важно, при бурении скважин в условиях АВПД. Полученные зависимости могут быть использованы в качестве априорной информации при построении геомеханических моделей указанных объектов на территории Западной Сибири.

Ключевые слова: анизотропия, лабораторные исследования керна, упругие свойства, геомеханические керновые исследования, корреляционные зависимости, геомеханическое моделирование

Для цитирования: Кулешов В. С., Недомовный Б. Н., Кудымов А. Ю., Распутин Н. А., Юрьева Н. А. Влияние анизотропии на упругие свойства горной породы // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 2. С. 153-174. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.7>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию: 11.12.2024;
одобрена после рецензирования 11.03.2025;
принята к публикации 10.04.2025;

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

The effect of anisotropy on the elastic properties of rock

**Vasiliy S. Kuleshov¹,
Bogdan N. Nedomovnyi^{2*},
Alexey Ju. Kudymov³,
Nikolay A. Rasputin⁴,
Natalia Ju. Yurieva⁵**

¹ LLC RN-Technologies (1, Ramenskiy Blvd, Moscow, 119607, Russian Federation)

^{2,3} LLC Tyumen Oil Research Center (42, Maxim Gorky St., Tyumen, 625000, Russian Federation)

^{4,5} ROSPAN INTERNATIONAL JSC (16B, Geologorazvedchikov St., Novy Urengoy, 629306, Russian Federation)

¹ vskuleshov@rosneft.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7542-0518>

² bnnedomovnyi@tnc.rosneft.ru; <https://orcid.org/0009-0007-8614-4118>

³ aykudymov@tnc.rosneft.ru; [tps://orcid.org/0009-0001-2432-4419](https://orcid.org/0009-0001-2432-4419)

⁴ narasputin@rspn.rosneft.ru; <https://orcid.org/0009-0004-4938-3580>

⁵ nyepifantseva@rspn.rosneft.ru; <https://orcid.org/0009-0007-7355-5428>

* Corresponding author

Abstract.

With the growing interest in hard-to-recover hydrocarbon reserves, there is a need to increase the detail and quality of modeling the rock mass and reservoir formation. Taking into account the mechanical anisotropy of the medium, in particular caused by the layering of thin layers, provides a more complete picture of the stress-strain state of both the reservoir formation itself and barriers / bridges, which in turn opens up additional opportunities for optimizing the processes of field development, increasing the efficiency of hydraulic fracturing, as well as drilling wells. The technology of conducting laboratory studies of core material to study the anisotropy of elastic properties is described in the present study. Based on the results, the correlations for the elastic characteristics of rocks of the Sortym, Bazhenov and Abalak formations were obtained. Using the example of one of the deposits in Western Siberia, the results of constructing two types of hem-mechanical models (isotropic and anisotropic) are demonstrated. With the reference to comparison of values of the minimum horizontal stress and the absorption onset gradient, it is shown that the anisotropy of elastic properties has a significant effect on the stress-strain state of the rock mass. The use of isotropic models for anisotropic media leads to a significant underestimation of horizontal stresses / gradients of the onset of absorption, which, in turn, does not allow to unlock the potential of hydraulic fracturing, as well as to choose the optimal depth range for casing descent, which is critically important when drilling wells under conditions of AHFP. The obtained dependences can be used as a priori information in constructing geomechanical models of these objects in Western Siberia.

Keywords:

anisotropy, laboratory core studies, elastic properties, geomechanical core studies, correlation dependencies, geomechanical modeling

For citation:

Kuleshov VS, Nedomovnyi BN, Kudymov AYu, Rasputin NA, Yurieva NYu. The effect of anisotropy on the elastic properties of rock. Science. Innovation. Technologies. 2025;(2):153-174 (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.7>

Conflict of interest:

the authors declare no conflicts of interests.
The article was submitted 11.12.2024;
approved after reviewing 11.03.2025;
accepted for publication 10.04.2025;

Введение

Многие горные породы являются трансверсально-анизотропными, то есть имеют различные свойства относительно плоскости залегания пласта. Наиболее ярко свойства анизотропии проявляются в глинистых отложениях, которые имеют слоистую структуру залегания [1, 2]. Например, значения вертикального модуля Юнга (в плоскости перпендикулярной залеганию пласта) существенно отличаются от горизонтального модуля Юнга (в параллельной плоскости залегания пласта). Более того, анизотропии подвержены не только упругие свойства среды, но и акустические [3, 4].

Понимание анизотропии и ее механизмов формирования имеет ключевое значение при анализе и интерпретации сейсморазведочных работ и микросейсмического мониторинга, а также при бурении скважин и проведении операций гидравлического разрыва пласта (ГРП). По этой причине современные модели (геологические, петрофизические, гидродинамические, геомеханические) должны учитывать трещиноватость, тонкослоистое напластование, ориентацию пор/трещин/минералов и другие разномасштабные особенности пласта с целью обеспечения подбора наиболее оптимальных технологий разработки месторождения.

В частности, технология ГРП – одна из ключевых технологий, широко применяемая для интенсификации притока, базируется на результатах геомеханического моделирования. В виду отсутствия необходимых лабораторных исследований инженеры в области геомеханического моделирования зачастую используют изотропные пороупругие модели, что является сильным допущением, далеко не всегда позволяющим достичь максимальной эффективности при планировании операции ГРП [5, 6, 7]. Поэтому достоверный расчет горизонтальных напряжений является первостепенной задачей.

В случае слоистых отложений, когда разрез пласта возможно описать как трансверсально-изотропную среду, значения минимальных горизонтальных напряжений примут следующий вид [8]:

$$\sigma_h^{vti} = \frac{E_h}{E_v} \frac{v_v}{1 - v_h} \cdot [\sigma_v - \alpha_v P_p] + \alpha_h P_p + \frac{E_h}{1 - v_h^2} \cdot [\varepsilon_h - v_h \varepsilon_H], \quad (1)$$

где σ_h^{vti} – минимальные горизонтальные напряжения для VTI среды;

- E_h и E_v – модуль Юнга;
 ν_h и ν_v – коэффициент Пуассона;
 α_h и α_v – константа Био;
 ε_h и ε_H – заданные тектонические деформации, действующие вдоль азимута минимального и максимального горизонтальных напряжений;
 σ_v – вертикальное напряжение;
 P_p – поровое давление.

В соотношении (1) индекс h обозначает свойства среды в плоскости изотропии свойств, а индекс v – в направлении перпендикулярной к ней.

Соотношение (1) в случае изотропной среды, когда свойства не зависят от направления ($E_h = E_v$; $\nu_h = \nu_v$; $\alpha_h = \alpha_v$) и опуская индексы h и v , можно представить в более простом виде:

$$\sigma_h^{\text{iso}} = \frac{\nu}{1 - \nu_h} \cdot [\sigma_v - \alpha P_p] + \alpha P_p + \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot [\varepsilon_h - \nu \varepsilon_H], \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) видно, что горизонтальные напряжения являются сложной функцией и зависят от коэффициента Пуассона, модуля Юнга, вертикального напряжения, порового давления, коэффициента пороупругости и добавочных тектонических напряжений, обусловленных тектоническими деформациями. При этом профиль горизонтальных напряжений обуславливается комплексным параметром $\lambda_h^{\text{vi}} = \frac{E_h}{E_v} \frac{\nu_v}{1 - \nu_h}$ – в случае VTI среды и $\lambda_h^{\text{iso}} = \frac{\nu}{1 - \nu_h}$ – изотропной среды. То есть в случае VTI среды профиль напряжений зависит не только от коэффициента Пуассона, но и в первую очередь от соотношения вертикального модуля Юнга к горизонтальному.

Поэтому целью данной работы является анализ анизотропии упругих свойств горной породы путем проведения лабораторных исследований на образцах керна, отобранных на одном из месторождений Западной Сибири, которое характеризуется аномально-высоким пластовым давлением. Следует отметить, что настоящая работа посвящена изучению вертикально трансверсально-изотропных сред (VTI), вызванных в первую очередь тонкослоистым переслаиванием пластов. Горизонтально поперечно-

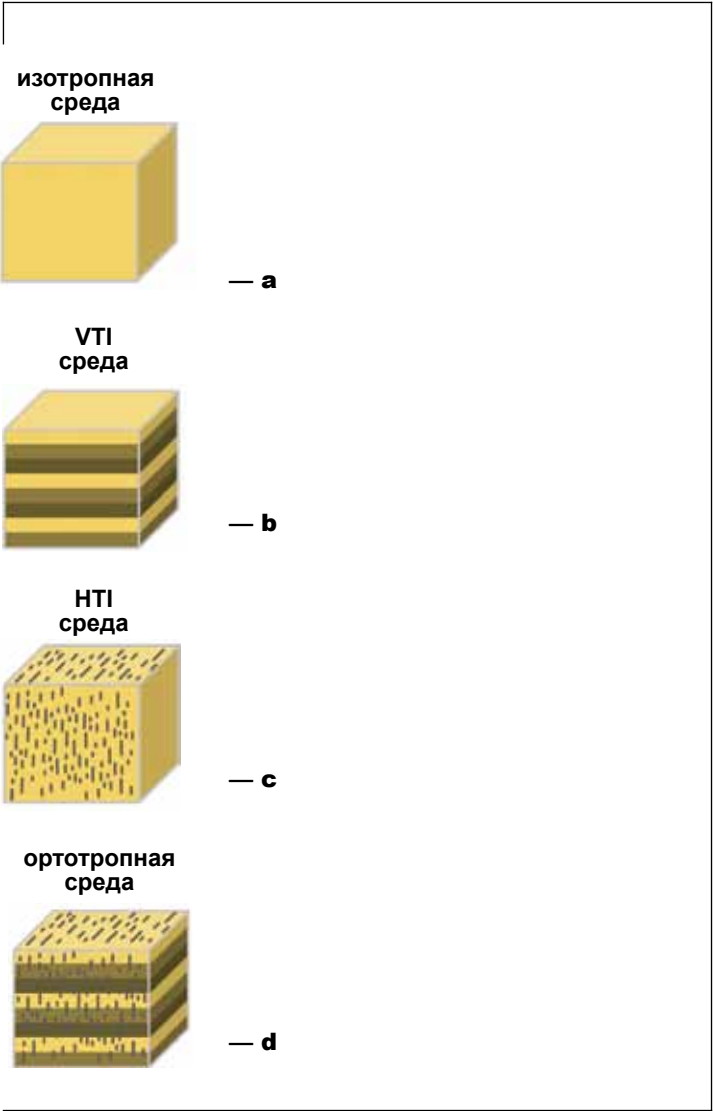


Рис. 1. Схематическое представление различных типов пород [9]: (а) – изотропная среда; (б) – трансверсально-изотропная среда (слоистые породы); (с) – поперечно-изотропная среда (естественно трещиноватый коллектор); (д) – ортотропная среда (слоистые породы с присутствием естественной трещиноватости).

Fig. 1. Schematic representation of various types of rocks [9]: (a) – isotropic medium; (b) – transversally isotropic medium (layered rocks); (c) transversely isotropic medium (naturally fractured collector); (d) – orthotropic medium (layered rocks with the presence of natural fracturing).

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

изотропные среды (НТИ) или ортотропные среды (ОРТ) в рамках данной работы не рассматриваются (рис. 1).

Материалы и методы исследований

Лабораторные исследования по определению анизотропии упругих характеристик кернового материала проводились на модернизированной испытательной установке Shimadzu AG-300kN, оснащенной механическим приводом, жидкостными насосами и камерой для создания обжимного давления. В общем виде установка представляет собой камеру высокого давления со встроенной системой создания осевой нагрузки с гидравлическим приводом (рис. 2). Напряжение обжима на образцах создается и поддерживается с помощью камеры псевдотрехосного сжатия совместно с приводами и усилителями сжатия. Дополнительно лабораторная установка оснащена: линией для создания порового давления, системой терморегулирования, устройством измерений продольной и поперечной деформаций, системой измерений скоростей упругих волн.

С целью определения интервалов, которые не содержат скрытую трещиноватость, при разметке керна используются данные рентгеновской компьютерной томографии. После определения целостных интервалов керна выполняется отбор и изготовление образцов цилиндрической формы диаметром 30 мм и длиной 60 мм, с отношением высоты образца к его диаметру равном 2:1 согласно [10], под различными углами относительно плоскости залегания пласта. При этом повторная компьютерная томография позволяет выполнить контроль качества и целостности, подготовленных образцов керна.

Экстракция образцов горной породы приводит к удалению связанной с глиной воды из глинистых минералов, что в последующем пагубно влияет на механическое поведение горных пород [11]. Поэтому все лабораторные эксперименты проводятся на неэкстрагированных образцах, с последующим их донасыщением рабочей жидкостью – керосином, в условиях максимально приближенных к пластовым (термобарические условия). Условия проведения лабораторных тестов определены предварительно путем построения



Рис. 2. Фотографии лабораторной установки (а) и подготовки образца горной породы к тестам (b) / Fig. 2. Photos of the laboratory installation (a) and preparation of the rock sample for tests (b)

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

одномерной геомеханической модели с ее калибровкой на фактические данные бурения скважин и данные гидравлического разрыва пласта.

Каждый образец керна изначально сжимается под изостатическим напряжением до заданной величины за счет создания давления, действующего на манжету (термоусадочную трубку) в камере, и приложения эквивалентного осевого напряжения [12].

Проведение экспериментов осуществляется путем увеличения осевой нагрузки на образец с заданной скоростью (0,5 МПа/с, либо 10^{-5} с^{-1}). В процессе эксперимента обжимное и поровое давления поддерживается с помощью насосов на постоянном уровне.

Деформации образца для определения статических упругих свойств измерялись датчиками деформаций в осевом и радиальном направлении, а для определения динамических упругих свойств регистрировались скорости ультразвуковых продольных и поперечных волн.

Результаты исследований и их обсуждение

С определенного интервала отобран набор из трех образцов керна – дублеров (схожих по литологии и ГИС), таким образом, что ось цилиндрических образцов керна ориентирована под углами $\beta = 0^\circ$, 45° и 90° относительно плоскости залегания пласта, что позволяет полностью охарактеризовать механическую анизотропию горной породы. Исследования по определению анизотропии упругих характеристик горной породы выполнены на образцах керна, отобранных из интервалов Сортымской, Абалакской и Баженовской свит.

На всех подготовленных образцах были выполнены исследования по определению предела прочности при объемном сжатии с измерением динамических и статических упругих свойств согласно методике, описанной выше. В результате проведения лабораторных тестов определены: E_{sh} , E_{sv} , E_{st} – значения статического модуля Юнга, E_{dh} , E_{dv} , E_{dt} – значения динамического модуля Юнга, ν_{sh} , ν_{sv} , ν_{st} – значения статического коэффициента Пуассона и ν_{dh} , ν_{dv} , ν_{dt} – значения динамического коэффициента Пуассона. Индекс h характеризует значения в плоскости изотропии свойств ($\beta = 0^\circ$), индекс v

в перпендикулярной к ней плоскости ($\beta = 90^\circ$), а индекс t в наклонной плоскости ($\beta = 45^\circ$).

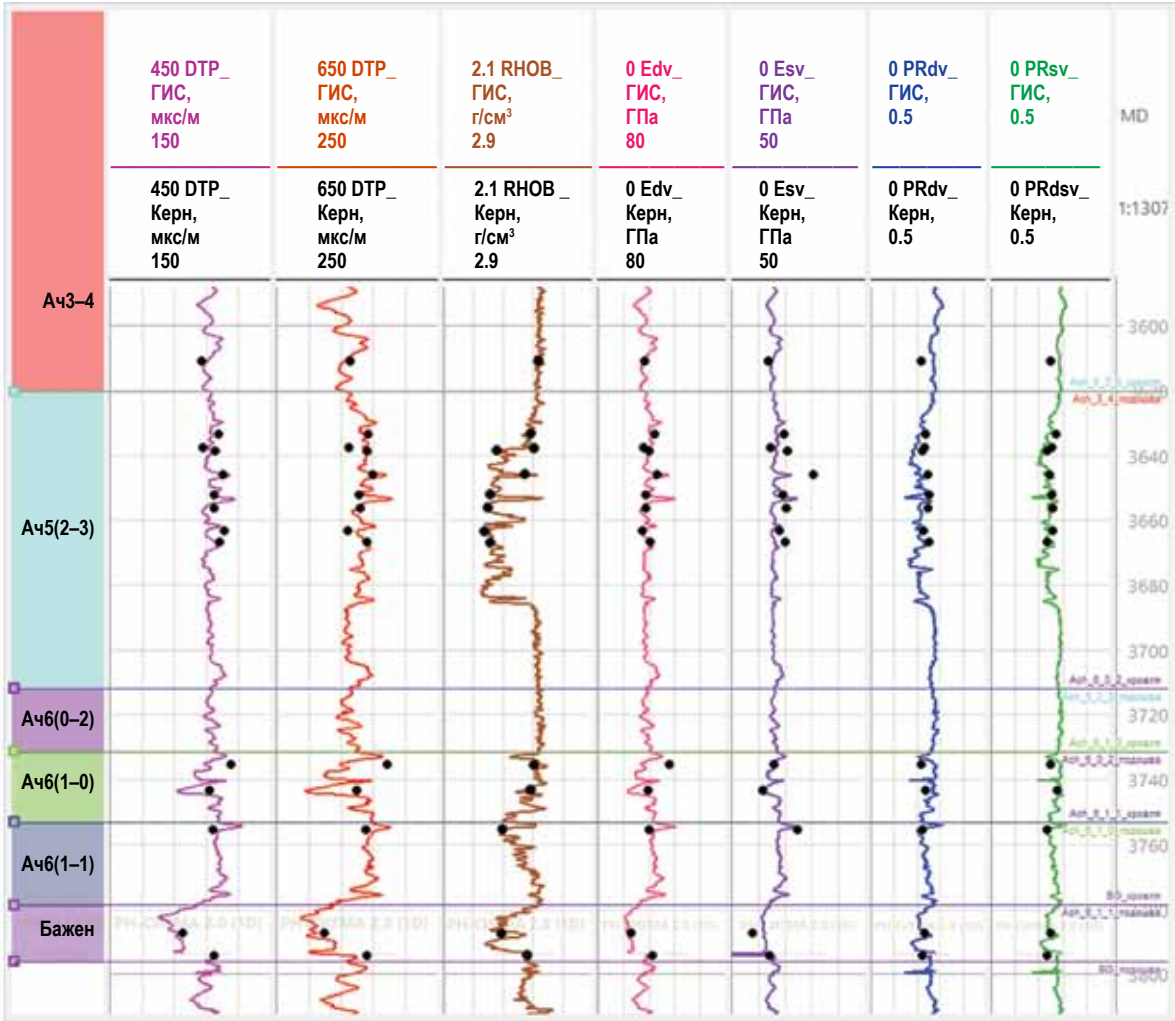
В работе [13] показано, что при проведении лабораторных исследований ключевым является корректное задание термобарических условий. В связи с этим, по результатам проведения исследований выполнено сравнение данных ГИС с лабораторными данными (рис. 3). На рисунке представлено сравнение акустических и упруго-прочностных свойств (сплошная линия), таких как интервальное время пробега продольной (DTP) и поперечной (DTS) волн соответственно; объемная плотность насыщенного образца керна (RHOV); динамический (E_{dv}) и статический (E_{sv}) вертикальный модуль Юнга, а также динамический (ν_{dv}) и статический (ν_{sv}) вертикальный коэффициент Пуассона с аналогичными данными, полученными на керне в лабораторных условиях (точки). Величина невязки между данными ГИС и результатами керновых исследований для большинства интервалов не превышает 5 %, исключение составили 2 точки в интервале Ач6(1–0), где невязка составила 17 %. Хорошее согласование между данными ГИС и результатами тестирования керна свидетельствует о корректности задания термобарических условий при проведении лабораторных исследований.

Следует отметить, что в приведенном ниже анализе рассмотрена исключительно взаимосвязь между вертикальными и горизонтальными упругими свойствами.

В ходе анализа результатов лабораторных исследований установлено, что значения статического вертикального и горизонтального модуля Юнга существенно различны (рис. 4). Из рисунка видно, что исследования охватывают достаточно большой интервал изменения модуля Юнга ($8 \text{ ГПа} < E_{sv} < 25 \text{ ГПа}$). При этом отношение горизонтального (E_{sh}) модуля Юнга к вертикальному (E_{sv}) связано с вертикальным модулем Юнга и хорошо описывается корреляционной зависимостью в виде степенной функции:

$$\frac{E_{sh}}{E_{sv}} = 6,0 \cdot E_{sv}^{-0,52}. \quad (3)$$

То есть для более эластичных горных пород, которым соответствуют более низкие значения модуля Юнга, ве-



личина анизотропии модуля Юнга имеет повышенные значения относительно более жестких пород с более высокими значениями модуля Юнга. Результаты лабораторных исследований показывают, что зависимость между горизонтальным и вертикальным статическим модулем Юнга описывается единой корреляционной зависимостью для разных свит. При этом из соотношения (3) видно, что значение горизонтального модуля Юнга эквивалентно квадратному корню из модуля Юнга, а отношение горизонтального модуля Юнга к вертикальному достигает 2,8 раз для отложений Баженовской свиты. Средние значения анизотропии модуля Юнга для Сортымовской свиты (АЧ пласты) составляет 1,6; для Абалакской свиты – 1,7; для Баженовской свиты – 2,0; среднее значение анизотропии модуля Юнга по всем пластам составляет 1,8.

Следует отметить, что для уточнения и повышения ее достоверности корреляционной зависимости (рис. 4) необходимо проведение дополнительных исследований на образцах керна с более низкими и более высокими значениями модуля Юнга для получения концевых точек.

В работе также выполнен анализ анизотропии как динамического коэффициента Пуассона, так и статического (рис. 5). Из рисунка видно, что данные динамических и статических исследований лежат в едином тренде, что позволяет записать единую корреляционную зависимость в виде линейной функции от коэффициента Пуассона:

$$\frac{\nu_v}{1 - \nu_h} = 1,49 - 0,046 \quad (4)$$

Из соотношения (4) уже можно выразить значение горизонтального коэффициента Пуассона. Так как данные динамических и статических исследований лежат в едином тренде, на рисунке опущены индексы d и s для коэффициента Пуассона. При этом разница между горизонтальным и вертикальным коэффициентами Пуассона достигает 1,2 раза. Однако, в целом, можно сказать, что вертикальный и горизонтальный коэффициент Пуассона эквивалентны друг другу, то есть $\nu_v \approx \nu_h$.

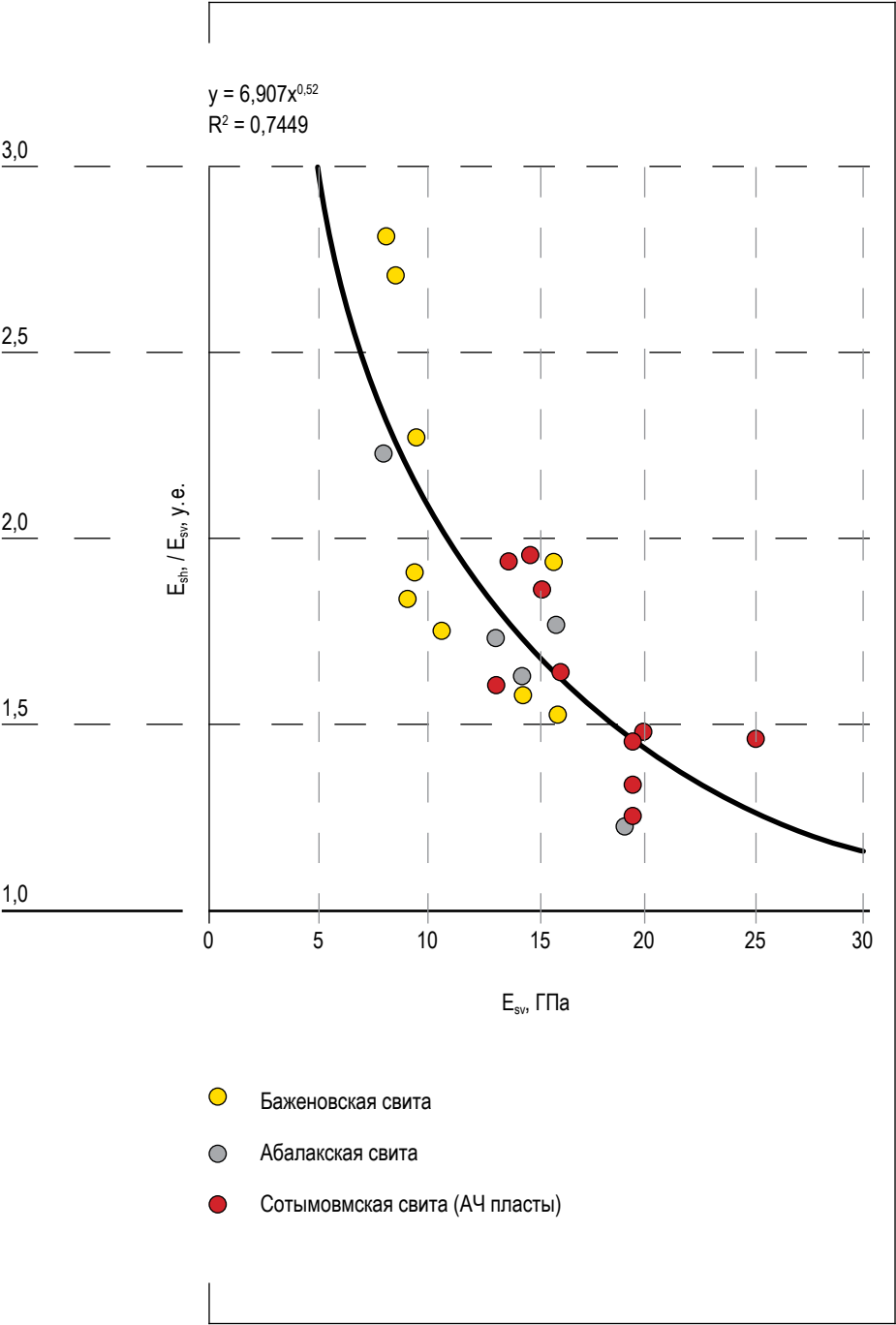


Рис. 4. Анизотропия статического модуля Юнга.
Fig. 4. Anisotropy of the static Young's modulus
Источник: составлено авторами.
Source: compiled by the authors.

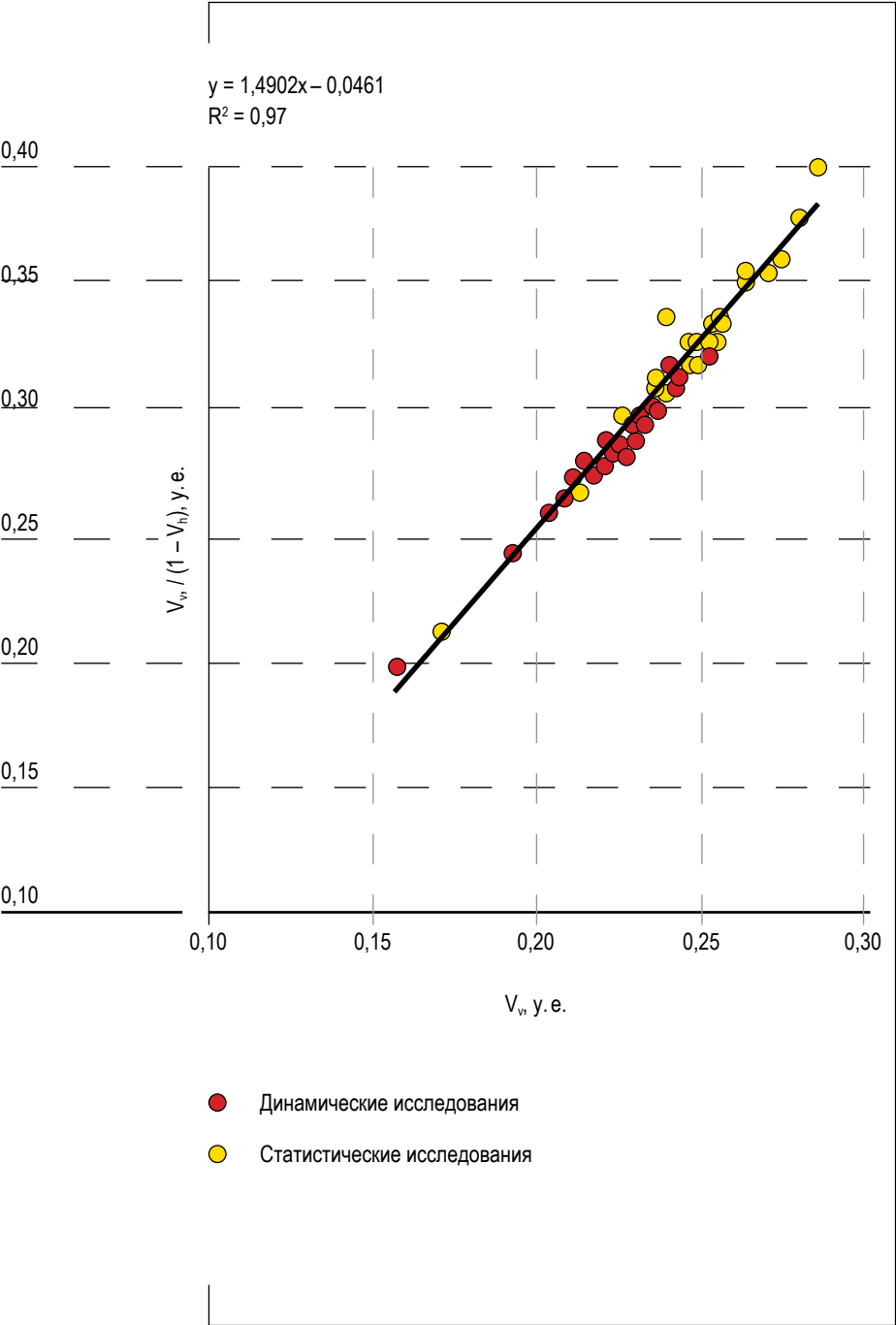


Рис. 5. Анизотропия коэффициента Пуассона.

Fig. 5. Anisotropy of the Poisson's ratio.

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

Следует отметить, что, полученные в рамках данной работы общие закономерности анизотропии упругих свойств, согласуются с результатами ранее опубликованных работ, выполненных зарубежными авторами на сланцевых отложениях [14].

На основе полученных результатов лабораторных исследований выполнено сравнение комплексного параметр λ^{vti} , с аналогичным параметром, записанным для изотропного случая λ^{iso} (рис. 7). Анализируя полученные результаты установлено, что явной зависимости между λ^{vti} и λ^{iso} нет. При этом отношение $\lambda^{vti}/\lambda^{iso}$ изменяется от 1,1 до 2,7, а максимальные отклонения отмечаются для отложений Баженовской свиты.

Следовательно, если рассмотреть соотношения (1) и (2) в терминах эффективных напряжений и пренебречь добавочными тектоническими напряжениями, обусловленных тектоническими деформациями, получим:

$$\sigma_h^{vti} = \frac{\lambda^{vti}}{\lambda^{iso}} \cdot \sigma_h^{iso} = k \cdot \sigma_h^{iso} \quad (5)$$

где σ_h^{vti} и σ_h^{iso} – эффективные минимальные горизонтальные напряжения для трансверсально-изотропной и изотропной сред;

k – переводной коэффициент, показывающий прирост эффективных напряжений за счет VTИ анизотропии: для Сортымовской свиты (АЧ пласты) составляет 1,6; для Абалакской свиты – 1,7; для Баженовской свиты – 2,1. Следует отметить, что параметр k соответствует средним значениям анизотропии модуля Юнга, так как в целом $\nu_v \approx \nu_h$.

Это означает, что VTИ анизотропия приводит к увеличению эффективных напряжений в глинистых породах Сортымовской свиты (АЧ пласты) в среднем на 60%; Абалакской свиты – 70%; Баженовской свиты – 110%. Следовательно, горизонтальные напряжения для VTИ среды значительно отличаются от изотропной среды, а модели для изотропных сред, применяемые к анизотропным приводят, к существенным занижениям горизонтальных на-

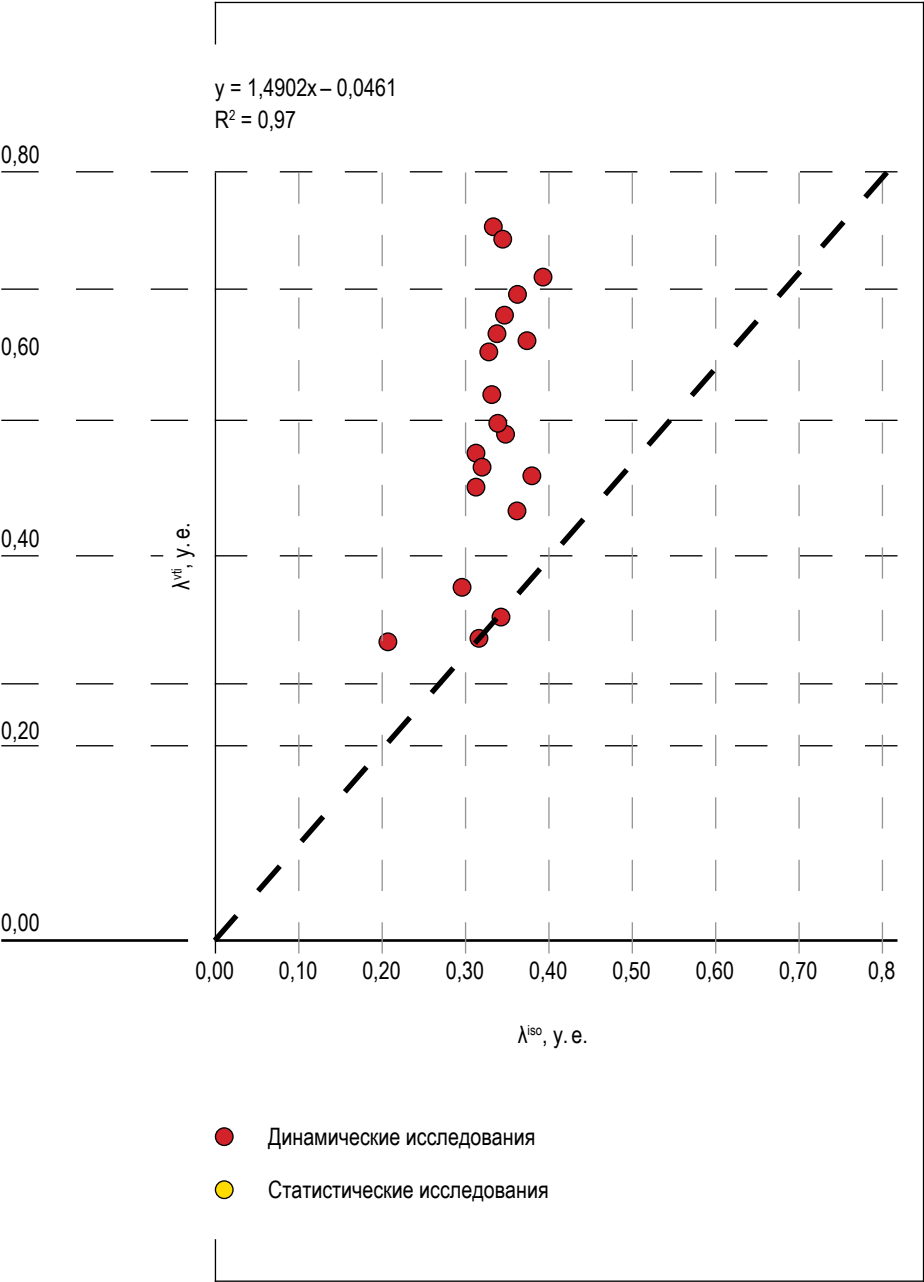


Рис. 6. Сравнение коэффициентов бокового распора для трансверсально-изотропной среды (λ_h^{vi}) и изотропной среды (λ_h^{iso}).

Fig. 6. Comparison of lateral expansion coefficients for a transversally isotropic medium (λ_h^{vi}) and an isotropic medium (λ_h^{iso})

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

пряжений в глинистых барьерах и как следствие к некорректному моделированию трещины ГРП, а также к заниженным значениям градиентов начала поглощений и ГРП в не коллекторе, что особенно критично при бурении скважин в условиях АВПД для оптимального спуска обсадных колон.

В качестве примера рассмотрим некоторые характерные значения для одного из месторождений Западной Сибири, которое характеризуется аномально-высоким пластовым давлением (табл. 1). В таблице представлены такие параметры как вертикальная глубина залегания пласта; градиент порового давления, градиент начала поглощений с учетом анизотропии и без учета, а также обозначенные переменные в абсолютных значениях.

Таблица 1.

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
В ГЛИНИСТЫХ БАРЬЕРАХ
Table 1. The effect of anisotropy of mechanical properties
on the stress-strain state in clay barriers

Свита	PPMW, г/см³	P _p , атм	Изотропная модель		Анизотропная модель		Прирост напряжений, атм
			LOSS, г/см³	σ_h^{iso} , атм	LOSS, г/см³	σ_h^{vti} , атм	
Сортымоская свита (АЧ пласты)	1,63	619	1,82	691	1,93	734	43
Баженовская свита	1,80	692	1,95	750	2,12	813	63
Абалакская свита	1,82	720	2,03	803	2,18	862	58

Источник: составлено авторами.

Source: compiled by the authors.

Из таблицы видно, что влияние анизотропии существенным образом сказывается на величину минимальных горизонтальных напряжений (σ_h^{iso} и σ_h^{vti}) в глинистых отложениях, следовательно, и на градиентах начала поглощений (LOSS). Так прирост напряжений с глинистых перемычек согласно (5) достигает ~60 атм, что существенным образом влияет на распространение и локализа-

цию трещины ГРП. При этом абсолютная величина порового давления (P_p) и градиент ГНВП (PPMW) являются неизменными, так как не зависят от VTИ анизотропии.

Данный пример служит иллюстрацией того, как анизотропия свойств влияет на напряженно-деформированное состояние горного массива. Для более точного и детального описания напряженно-деформированного состояния рекомендуется воспользоваться соотношениями (3) и (4) с привлечением инженеров в области геомеханического моделирования.

Заключение

В работе представлены результаты проведения лабораторных исследований по влиянию VTИ анизотропии на упругие свойства горной породы на образцах керна отобранных с Сортымской, Абалакской и Баженовской свит. Исследования охватывают достаточно большой интервал изменения упругих параметров ($8 \text{ ГПа} < E_{sv} < 25 \text{ ГПа}$ и $0,16 < \nu_v < 0,29$).

В работе показано, что более эластичные горные породы, которым соответствуют более низкие значения модуля Юнга, величина анизотропии модуля Юнга достигает 2,8 раз. Для более жестких пород величина анизотропии модуля Юнга монотонно уменьшается и стремится к 1 (то есть к изотропной среде). Разница между горизонтальным и вертикальным коэффициентами Пуассона достигает 1,2 раза. Однако, в общем, можно сказать, что вертикальный и горизонтальный коэффициент Пуассона эквивалентны друг другу, то есть $\nu_v \approx \nu_h$.

В работе также показано, что VTИ анизотропия приводит к увеличению эффективных напряжений в глинистых породах Сортымской свиты (АЧ пласты) в среднем 1,6 раз; Абалакской свиты – 1,7 раз; Баженовской свиты – 2,1 раз. Следовательно, горизонтальные напряжения для VTИ среды значительно отличаются от изотропной среды, а модели для изотропных сред, применяемые к анизотропным приводят, к существенным занижениям горизонтальных напряжений в глинистых барьерах и как следствие к некорректному моделированию трещины ГРП, а также к заниженным значениям градиентов начала поглощений и ГРП.

Для уточнения корреляционных зависимостей необходимо проведение дополнительных исследований на образцах керна с более низкими и более высокими значениями упругих параметров горной породы для получения концевых точек.

Представленные результаты, в виде корреляционных зависимостей (3) и (4), предполагается использовать для расчёта напряжённо-деформированного состояния при построении одномерных и трехмерных геомеханических моделей, которые едины для Сортымской, Баженовской и Абалакской свит.

Список источников

1. Thiercelin M. J., Plumb R. A. Core-based prediction of lithologic stress contrasts in East Texas formations // Society of Petroleum Engineers. 1994. No. 9 (4). P. 251–258. <https://doi.org/10.2118/21847-PA>
2. Knorr A. F. The Effect of Rock Properties on Fracture Conductivity in the Eagle Ford and Fayetteville shales. Texas A & M University, 2016. 124 p.
3. Tsuneyama F., Mavko G. Velocity anisotropy estimation for brine-saturated sandstone and shale // The Leading Edge. 2005. No. 24. P. 882–888. <https://doi.org/10.1190/1.2056371>
4. Vernik L., Liu X. Velocity anisotropy in shales // A petrophysical study: Geophysics. 1997. No. 62. P. 521–532. <https://doi.org/10.1190/1.1444162>
5. Higgins S., Goodwin S., Donald A., Bratton T., Tracy G. Anisotropic stress models improve completion design in the Baxter shale // Society of Petroleum Engineers. 2008. No. 62. P. 2–10. <https://doi.org/10.2118/115736-MS>
6. Pavlyukov N., Pavlov V., Samoilov M., Prokhorov A., Korolev A., Yagudin R., Kamionko M., Aleksandrov A., and Danil S. TIV-Anisotropy in Geomechanical Modeling for Planning of Hydraulic Fracturing at the Kharampurskoye Field // SPE Russian Petroleum Technology Conference. 2020. P. 12–21. <https://doi.org/10.2118/202049-MS>
7. Crawford B., Liang Y., Gaillot P., Amalokwu K., Wu X., Valdez R. Determining Static Elastic Anisotropy in Shales from Sidewall Cores: Impact on Stress Prediction and Hydraulic Fracture Modeling // Unconventional Resources Technology Conference (URTeC). 2020. P. 1–8. <https://doi.org/10.15530/urtec-2020-2206>

8. Higgins S., Goodwin S., Donald A., Bratton T., Tracy G. Anisotropic Stress Models Improve Completion Design in the Baxter Shale // *Proceedings – SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. 2008. P. 2–10. <https://doi.org/10.2118/115736-MS>
9. Close D., Cho D., Horn F., Edmundson H. The sound of sonic: a historical perspective and introduction to acoustic logging // *CSEG Recorder*. 2009. No. 34 (5). P. 34–43. URL: <https://csegrecorder.com/articles/view/the-sound-of-sonic-a-historical-perspective-and-intro-to-acoustic-logging> (accessed: 19. 08. 2024).
10. ГОСТ 21153.0. Породы горные. Отбор проб и общие требования и методам физических испытаний. М.: Издательство стандартов. 1982. С. 3–5.
11. Moore D. E., Lockner D. A. Crystallographic controls on the frictional behavior of dry and water-saturated sheet structure minerals // *Journal of Geophysical Research*. 2004. No. 109 (3). P. 1–16. <https://doi.org/10.1029/2003JB002582>
12. McPhee C., Reed J., Zubizarreta I. Core analysis: a best practice guide. Elsevier. 2015. 829 p.
13. Павлов В. А., Кулешов В. С., Кудымов А. Ю., Якубовский А. С., Субботин М. Д., Пташный А. В., Абзгильдин Р. Р., Максимов Е. В. Влияние природы насыщающего агента на упруго-прочностные свойства пород газовых месторождений // *Экспозиция Нефть Газ*. 2021. № 1. С. 11–16. <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2021-1-11-16>
14. Sone H., Zoback M. Mechanical properties of shale-gas reservoir rocks – Part 1: Static and dynamic elastic properties and anisotropy // *Geophysics*. 2013. Vol. 78. P. 381–392. <https://doi.org/10.1190/geo2013-0050.1>

References

1. Thiercelin MJ, Plumb RA. Core-based prediction of lithologic stress contrasts in East Texas formations. *Society of Petroleum Engineers*. 1994;9(4):251-258. <https://doi.org/10.2118/21847-PA>
2. Knorr AF. The Effect of Rock Properties on Fracture Conductivity in the Eagle Ford and Fayetteville shales. Texas A & M University; 2016. 124 p.
3. Tsuneyama F, Mavko G. Velocity anisotropy estimation for brine-saturated sandstone and shale. *The Leading Edge*. 2005;24:82-888. <https://doi.org/10.1190/1.2056371>

4. Vernik L, and X Liu. Velocity anisotropy in shales. A petrophysical study: Geophysics. 1997;(62):521-532. <https://doi.org/10.1190/1.1444162>
5. Higgins S, Goodwin S, Donald A, Bratton T, Tracy G. Anisotropic stress models improve completion design in the Baxter shale. Society of Petroleum Engineers. 2008;(62):2-10. <https://doi.org/10.2118/115736-MS>
6. Pavlyukov N, Pavlov V, Samoilov M, Prokhorov A, Korolev A, Yagudin R, Kamionko M, Aleksandrov A, and Danil S. TIV-Anisotropy in Geomechanical Modeling for Planning of Hydraulic Fracturing at the Kharampurskoye Field. SPE Russian Petroleum Technology Conference. 2020;12-21. <https://doi.org/10.2118/202049-MS>
7. Crawford B, Liang Y, Gaillot P, Amalokwu K, Wu X, Valdez R. Determining Static Elastic Anisotropy in Shales from Sidewall Cores: Impact on Stress Prediction and Hydraulic Fracture Modeling. Unconventional Resources Technology Conference (URTeC). 2020;1-8. <https://doi.org/10.15530/urtec-2020-2206>
8. Higgins S, Goodwin S, Donald A, Bratton T, Tracy G. Anisotropic Stress Models Improve Completion Design in the Baxter Shale. Proceedings – SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 2008;2-10. <https://doi.org/10.2118/115736-MS>
9. Close D, Cho D, Horn F, Edmundson H. The sound of sonic: a historical perspective and introduction to acoustic logging. CSEG Recorder. 2009;34(5):34-43.
10. GOST 21153.0. Mountain rocks. Sampling and general requirements and methods of physical tests. Moscow: Publishing House of Standards; 1982. P. 3. (In Russ).
11. Moore DE, Lockner DA. Crystallographic controls on the frictional behavior of dry and water-saturated sheet structure minerals: Journal of Geophysical Research. 2004;109(3):1-16. <https://doi.org/10.1029/2003JB002582>
12. McPhee C, Reed J, Zubizarreta I. Core analysis: a best practice guide: Elsevier, 2015. P. 829.
13. Pavlov VA, Kuleshov VS, Kudymov AY, Yakubovskiy AS, Subbotin MD, Ptashnyy AV, Abzgildin RR, Maksimov EV. Influence of the nature of the saturating agent on the elastic-strength properties of gas field rocks. Exposition Oil Gas, 2021;(1):11-16. (In Russ). <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2021-1-11-16>

14. Sone Hiroki, Zoback Mark. Mechanical properties of shale-gas reservoir rocks – Part 1: Static and dynamic elastic properties and anisotropy. *Geophysics*. 2013;78:381-392. <https://doi.org/10.1190/geo2013-0050.1>

Информация об авторах

Василий Сергеевич Кулешов – кандидат физико-математических наук, эксперт отдела геолого-геофизических проектов ООО «РН-Технологии».

Богдан Николаевич Недомовный – ведущий специалист отдела разработки проектов геомеханики ООО «Тюменский нефтяной научный центр».

Алексей Юрьевич Кудымов – начальник отдела геомеханических исследований горных пород ООО «Тюменский нефтяной научный центр».

Николай Александрович Распутин – начальник отдела геолого-промысловых работ АО «РОСПАН ИНТЕРНЕШНЛ».

Наталия Юрьевна Юрьева – главный специалист отдела геолого-промысловых работ АО «РОСПАН ИНТЕРНЕШНЛ».

Вклад авторов: все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации

Information about the authors

Vasiliy S. Kuleshov – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Expert of the Department of Geological and Geophysical Projects, LLC RN-Technologies.

Bogdan N. Nedomovnyi – Leading Specialist of the Geomechanics Project Development Department, LLC Tyumen Petroleum Research Center.

Alexey Ju. Kudymov – Head of Geomechanical Rock Research Department, LLC Tyumen Petroleum Research Center.

Nikolay A. Rasputin – Head of the Department of Geological and Field Works, JSC Rospan International.

Natalia Ju. Yurieva – Main Specialist of the Department of Geological and Field Works, JSC Rospan International.

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



Научная статья
УДК 622.276
<https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.8>

РАЗДЕЛЕНИЕ ДОБЫЧИ И ЗАКАЧКИ НА УЧАСТКАХ СОВМЕСТНОЙ РАЗРАБОТКИ ДВУХ И БОЛЕЕ ПЛАСТОВ

Роман Александрович Нещади́мов

ЛУКОЙЛ-Инжиниринг (д. 143а, ул. Республики, Тюмень, 625000,
Российская Федерация)
Roman.Neschadimov@lukoil.com;
<https://orcid.org/0009-0002-2563-7721>

Аннотация.

Необходимость разделения добычи нефти, жидкости и закачки возникает на месторождениях, где в один эксплуатационный объект объединены два и более пласта. Корректное разделение добычи и закачки необходимо для локализации остаточных запасов и назначения геолого-технических мероприятий, направленных на их выработку. Возникновение ошибок на этапе разделения добычи и закачки приводит к неопределённости при локализации остаточных запасов, что становится причиной низкой эффективности геолого-технических мероприятий. По этой причине совершенствование методики разделения добычи и закачки при совместной разработке пластов является актуальной задачей. В качестве материалов для исследования были использованы публикации в отечественной и зарубежной научно-технической литературе, связанной с разделением добычи и закачки, а также промысловые данные и результаты интерпретации промыслово-геофизических исследований. С целью совершенствования методики разделения добычи и закачки на основании изученного отечественного и зарубежного опыта решения данной задачи были выделены наиболее значимые факторы, которые обязательно должны быть учтены в методике разделения. Предложена усовершенствованная методика разделения добычи нефти, жидкости и закачки при совместной разработке двух и более пластов, учитывающая изменение пластового давления, интервалов перфорации, продуктивности пластов, распространение трещин гидроразрыва пласта, а также различный характер обводнения пластов. Усовершенствованная методика

апробирована на одном из месторождений Западной Сибири, где осуществляется совместная разработка пластов. Выполнено разделение добычи нефти, жидкости и закачки в каждой скважине за весь период разработки, определена выработка запасов по пластам, установлено наличие непроизводительной закачки на участке апробации методики.

Ключевые слова: совместная эксплуатация, разделение добычи нефти, разделение добычи жидкости, разделение закачки, совместная разработка, характеристики вытеснения, материальный баланс

Для цитирования: Нещадимов Р. А. Разделение добычи и закачки на участках совместной разработки двух и более пластов // Наука. Инновации. Технологии. 2025. № 2. С. 175–196. <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.8>

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 25.02.2025;

одобрена после рецензирования 25.04.2025;

принята к публикации 12.05.2025.

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

Allocation of production and injection in areas of commingled production of two or more reservoirs

Roman A. Neshchadimov

LUKOIL-Engineering (143a, Republic St., Tyumen, 625000, Russian Federation)

Roman.Neschadimov@lukoil.com;

<https://orcid.org/0009-0002-2563-7721>

Abstract.

The need for separation of oil production, liquid and injection arises at fields where two or more formations are combined into one production facility. Correct allocation of production and injection is necessary for localization of residual reserves and assignment of geological and technical measures aimed at their development. The occurrence of errors at the stage of allocation of production and injection leads to uncertainty in localization of

residual reserves, which causes low efficiency of geological and technical measures. For this reason, improving the technique for production and injection allocation in commingled production is an urgent task. The materials used for the study were publications in national and foreign scientific and technical sources related to the separation of production and injection, as well as field data and the results of interpretation of field geophysical studies. In order to improve the technique of separation of production and injection, based on the studied national and foreign experience in solving this problem, the most significant factors to be taken into account in the allocation technique were identified. The study proposes an improved technique for allocation of oil, liquid production and injection during joint development of two formations with account of changes in reservoir pressure, perforation intervals, reservoir productivity, propagation of hydraulic fracturing cracks, as well as different nature of formation flooding. The improved technique has been tested at one of the fields in Western Siberia, where two oil reservoirs have been combined for commingled production. The allocation of oil, liquid production and injection in each well for the entire development period has been performed, the development of reserves by reservoirs has been determined, and the presence of unproductive injection in the area of the technique testing has been established.

Keywords: commingled production, oil production allocation, liquid production allocation, injection allocation, commingled development, decline curve, material balance

For citation: Neshchadimov RA. Allocation of production and injection in areas of commingled production of two or more reservoirs. Science. Innovations. Technologies. 2025;(2):175-196. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2308-4758.2025.2.8>

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

The article was submitted 25.02.2025;
approved after reviewing 25.04.2025;
accepted for publication 12.05.2025.

Введение

Необходимость разделения добычи нефти, жидкости и закачки возникает на месторождениях, где в один эксплуатационный объект объединены два и более пласта. Корректное разделение добычи и закачки имеет важное значение для локализации остаточных запасов и назначения геолого-технических мероприятий (ГТМ), направленных на их выработку. Возникновение ошибок на этапе разделения добычи и закачки приводит к неопределённости при локализации остаточных запасов, что может стать причиной низкой эффективности ГТМ. Следствием этого является снижение доходов недропользователя. Задача разделения добычи и закачки является сложной, комплексной и на данный момент не имеет единого и удовлетворительного решения [1, 2]. Целью представленной работы является совершенствование методики разделения добычи нефти, жидкости и закачки при совместной разработке двух и более нефтяных пластов в условиях Западной Сибири.

Материалы и методы исследований

В качестве материалов для исследования были использованы публикации в отечественной и зарубежной научно-технической литературе, связанной с разделением добычи и закачки, а также промысловые данные и результаты интерпретации промыслово-геофизических исследований (ПГИ). В ходе исследования применены методы гидродинамического моделирования, геолого-промыслового анализа и общенаучный подход.

Работа по совершенствованию методики разделения добычи и закачки была выполнена в три этапа:

1. Обзор существующих подходов к разделению добычи и закачки.
2. Совершенствование методики с учётом наиболее значимых факторов влияющих на разделение добычи и закачки.
3. Апробация усовершенствованной методики на одном из месторождений Западной Сибири.

Существующие подходы к разделению добычи и закачки подразделяются на две группы, которые, учитывая сложность задачи и высокую неопределённость, должны использоваться совместно и дополнять друг друга.

Первая группа включает в себя инструментальные методы и замеры [3], выполняемые непосредственно в скважине (дебитометрия, расходометрия), или исследования скважинной продукции в лаборатории (геохимические методы, применение маркеров и индикаторов [4, 5, 6, 7, 8]).

Вторая группа включает в себя расчётные методики. Существует множество различных расчётных методик разделения добычи и закачки. Наиболее часто встречаются методики, основанные на использовании коэффициентов проводимости, удельных дебитов, модели материального баланса, уравнения плоскорадиального притока [1, 9, 10, 11, 12]. Более подробный обзор существующих подходов к разделению добычи и закачки был представлен в ранее опубликованной работе [13].

Результаты исследований и их обсуждение

На основании изученного опыта разделения добычи и закачки выделены наиболее значимые факторы, которые обязательно должны быть учтены в методике разделения.

Первый из них связан с изменением дебита скважин в ходе процесса разработки по причинам, связанным с изменением пластового давления и взаимовлияния скважин.

Второй заключается в необходимости учитывать проведение гидроразрыва пласта (ГРП) и изменение интервалов перфорации. Оба этих мероприятия могут приводить к значительному изменению профиля притока и приёмистости в скважинах.

Третий связан с необходимостью учитывать изменение продуктивности пластов при их объединении для совместной эксплуатации [1].

Четвёртый заключается в различном характере обводнения пластов, объединённых для совместной разработки.

Для решения задачи связанной с изменением пластового давления предлагается использовать уравнение материального баланса В.М. Добрынина [14] (1):

$$\Sigma Q_n \cdot b_n + \Sigma Q_v = (V_n \cdot \beta_n + V_v \cdot \beta_v + V_{\text{пор}} \cdot \beta_{\text{пор}}) \cdot (P_o - P) + W_{\text{зак}} + W_{\text{законтур}} \quad (1)$$

где $\Sigma Q_n, \Sigma Q_v$ – накопленная добыча нефти, воды, м^3 ;
 $V_n, V_v, V_{\text{пор}}$ – начальный объём среды нефтенасыщенной, водонасыщенной, скелета породы, м^3 ;
 $\beta_n, \beta_v, \beta_{\text{пор}}$ – коэффициенты сжимаемости нефти, воды, породы, $1/\text{МПа}$;
 P_o, P – пластовое давление начальное, текущее, МПа ;
 b_n – объёмный коэффициент нефти, д. ед.;
 $W_{\text{зак}}$ – накопленная закачка, м^3 ;
 $W_{\text{законтур}}$ – приток законтурной воды, м^3 .

Решение уравнения выполняется для «замкнутых» элементов разработки в качестве которых могут выступать ряды добывающих скважин, ячейки площадных систем заводнения или отдельные залежи. Выбор элементов осуществляется в каждом случае индивидуально. Разделение закачки на границах «замкнутых» элементов осуществляется пропорционально углу, приходящемуся на каждый из элементов.

Наилучшим вариантом для разделения добычи после проведения гидроразрыва пласта или изменения интервалов перфорации является использование данных ПГИ, по этой причине данные ПГИ в предлагаемой методике имеют наивысший приоритет. В случае отсутствия исследований для разделения добычи после ГРП предлагается использовать формулу проводимости трещины (2) аналогично методике, предложенной в работе [15]:

$$C_{\text{гп}} = \frac{k_f \cdot w}{k \cdot x_f}, \quad (2)$$

где $C_{\text{гп}}$ – проводимость трещины;
 k_f, k – проницаемость соответственно пропанта и пласта, 10^{-3} мкм^2 ;
 w, x_f – соответственно ширина и полудлина трещины, м.

Для учёта изменения интервалов перфорации при отсутствии ГРП предлагается использовать коэффициент гидропроводности kh/μ ,

где k – коэффициент проницаемости, мкм^2 ,
 h – перфорированная толщина, м,
 μ – вязкость нефти, $\text{мПа}\cdot\text{с}$.

С целью учёта всех выполняемых на скважинах мероприятий по перфорации, ГРП и ПГИ, шаг расчёта принят равным одному месяцу.

В работе [1] установлено, что объединение нескольких продуктивных пластов в один объект разработки приводит к снижению их удельной продуктивности по сравнению с отдельной эксплуатацией. Причина этого заключается в том, что пропластки с наименьшей относительной проницаемостью не вовлекаются в разработку. Учитывать это явление предлагается путём определения граничного значения проницаемости или гидропроводности, ниже которого пропласток не принимает участия в добыче. Определение граничного значения осуществляется на основании данных ПГИ. Справедливость подобного подхода для пластов, где на фоне скважин применяется ГРП требует дополнительного изучения. По этой причине применение граничных значений для определения неработающих пропластков рекомендуется только на пластах, разрабатываемых без ГРП.

Определение обводнённости продукции каждого из пластов предлагается осуществлять с помощью характеристик вытеснения [16, 17, 18, 19]. Для подтверждения возможности использования предложенного подхода был выполнен ряд расчётов на синтетической гидродинамической модели (ГДМ).

Синтетическая гидродинамическая модель представляет из себя два однородных гидродинамически не связанных пласта. Размерность модели $31 \times 31 \times 2$. Размеры ячеек по горизонтали $dx = dy = 50$ м, по вертикали – $dz = 1$ м для пласта 1 и $dz = 4,3$ м для пласта 2. Модель включает в себя 12 добывающих и 4 нагнетательных скважины. Моделирование выполнено при соблюдении 100 % компенсации отборов закачкой в пластовых условиях. Расчёты выполнены в программном продукте Roxar Tempest. Параметры гидродинамической модели (ГДМ) приведены в таблице 1.

Таблица 1. ПАРАМЕТРЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
Table 1. Parameters of the hydrodynamic model

Параметры	Пласт 1	Пласт 2
Проницаемость, мкм ² ·10 ⁻³	150	300
Коэффициент пористости, д. ед.	0,22	
Коэффициент нефтенасыщенности, д. ед.	0,52	
Нефтенасыщенная толщина, м	1,4	4,3
Начальное пластовое давление, МПа	21,2	21,3
Вязкость нефти, мПа·с	1,83	
Плотность нефти, кг/м ³	836	

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

Было выполнено моделирование самостоятельной работы каждого из пластов с целью построения характеристик вытеснения по пластам. Наилучшим образом накопленная добыча нефти была воспроизведена с помощью характеристик вытеснения Назарова-Сипачёва и Сипачёва-Пасевича. Вид построенных характеристик приведён на рисунке 1.

Далее выполнено моделирование совместной разработки. После чего, полученная в результате моделирования добыча жидкости из двух пластов по скважинам, была разделена на каждом шаге расчёта между пластами пропорционально $kh/\mu \cdot \Delta P$ (k – коэффициент проницаемости, 10^{-3} мкм²; h – нефтенасыщенная толщина, м; μ – вязкость нефти, мПа·с, ΔP – депрессия на пласт, МПа). ΔP определена как разность между пластовым давлением, рассчитанным по формуле (1), и заданным забойным давлением. Сопоставление разделения добычи жидкости между пластами по результатам гидродинамического моделирования и предложенной методике приведено на рисунке 2 (а).

Разделение общей добычи нефти по каждой скважине за каждый год выполнено на основании построенных характеристик. На каждом шаге расчёта накопленное значение добычи жидкости (воды) подставлялось в полученные характеристики, в результате чего определялась «расчётная» добыча нефти. После этого суммар-

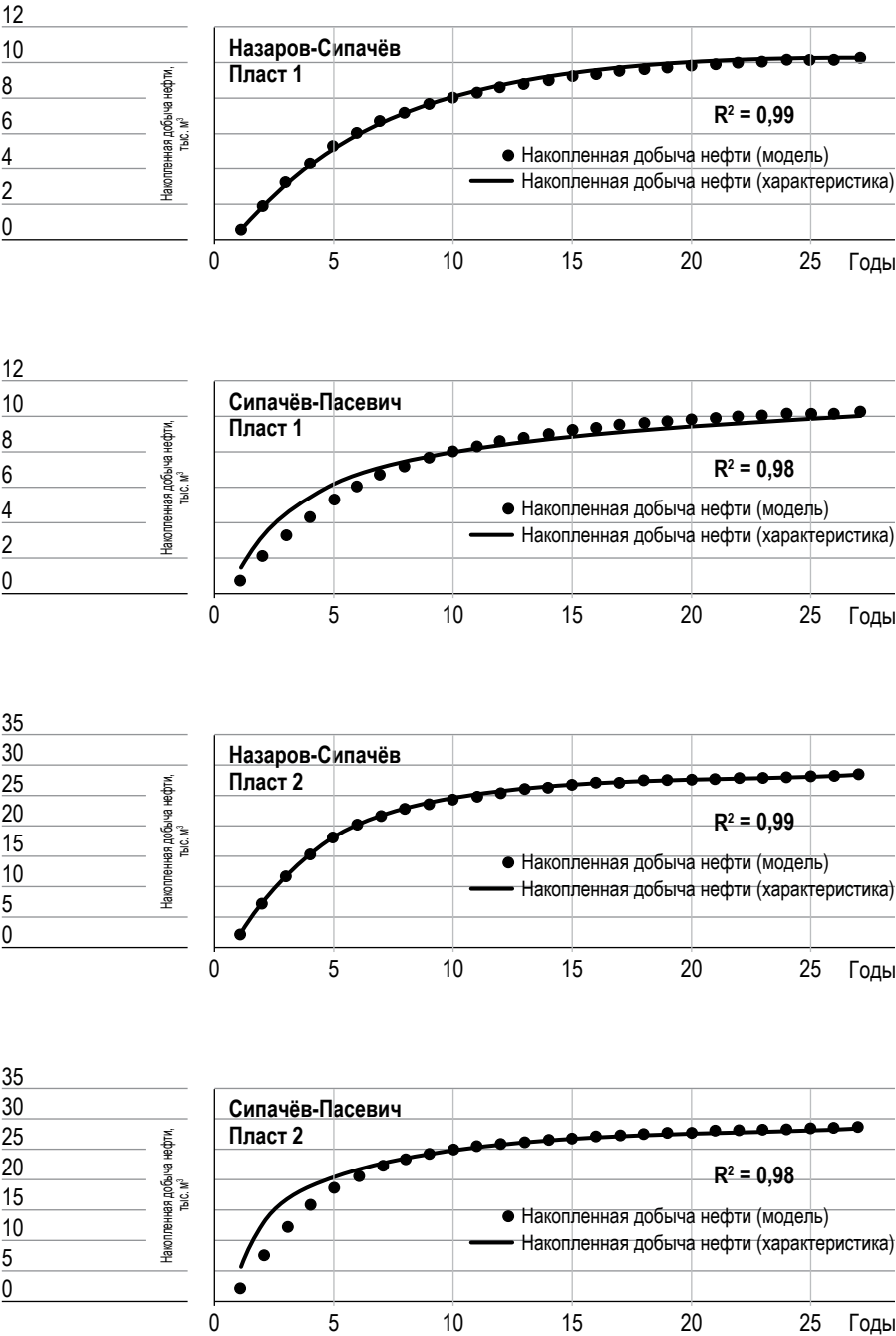


Рис 1. Построенные характеристики вытеснения.
Fig. 1. Constructed decline curve
Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

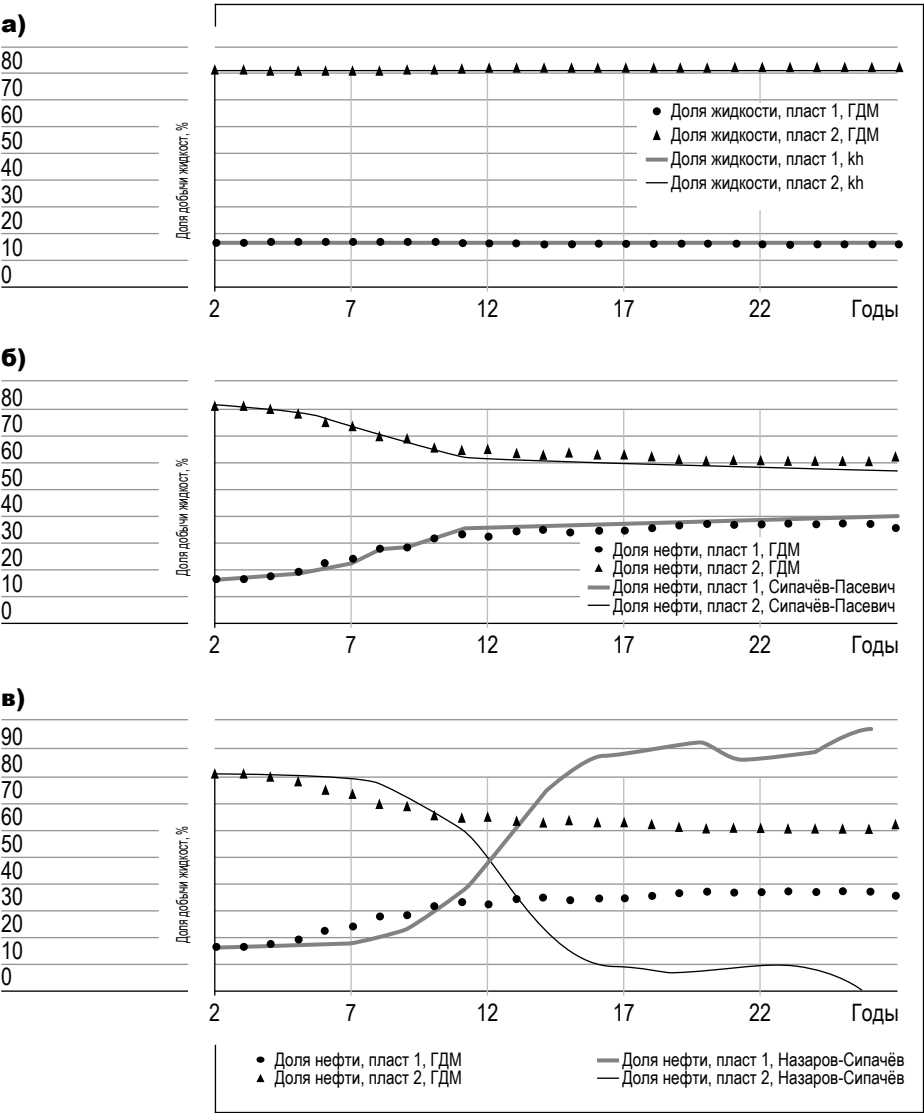


Рис. 2. Сопоставление разделения добычи жидкости между пластами по результатам гидродинамического моделирования и предложенной методике (а); сопоставление разделения добычи нефти между пластами по результатам гидродинамического моделирования и характеристикам вытеснения Сипачёва-Пасевича (б) и Назарова-Сипачёва (в).

Fig. 2. Comparison of the division of liquid production between layers based on the results of hydrodynamic modeling and the proposed method (a); comparison of the division of oil production between layers based on the results of hydrodynamic modeling and the decline curve of Sipachev-Pasevich (b) and Nazarov-Sipachev (c)

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

ная добыча нефти по скважине из модели делилась пропорционально «расчётной» добыче нефти. Сопоставление разделения добычи нефти по результатам гидродинамического моделирования и применения характеристик вытеснения приведено в таблице 2 и на рисунке 2 (б, в).

Таблица 2. СОПОСТАВЛЕНИЕ НАКОПЛЕННОЙ ДОБЫЧИ НЕФТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫТЕСНЕНИЯ
Table 2. Comparison of cumulative oil production based on the results of hydrodynamic modeling and the use of displacement characteristics

Методика разделения	Накопленная добыча нефти, тыс. м³	
	Пласт 1	Пласт 2
Гидродинамическая модель	117	381
Характеристика вытеснения Сипачёва-Пасевича	116	382
Характеристика вытеснения Назарова-Сипачёва	133	365

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

Вне зависимости от применённого подхода получены близкие показатели накопленной добычи нефти. При этом в динамике наиболее корректное решение получено с помощью характеристики вытеснения Сипачёва-Пасевича. По накопленной добыче данная характеристика вытеснения также позволяет получить разделение наиболее близкое к гидродинамическому расчёту. Таким образом было получено подтверждение возможности использования характеристик вытеснения в методике разделения добычи нефти.

Итоговый вид усовершенствованной методики разделения добычи нефти, жидкости и закачки представлен на рисунке 3.

Апробация методики была выполнена на участке одного из месторождений в Западной Сибири. На котором в один эксплуатационный объект объединены два пласта тюменской свиты (рис. 4). Пласты данного объекта характеризуются низкой проницаемостью (менее $20 \text{ мкм}^2 \cdot 10^{-3}$), соотношение проницаемостей между пластами 1:5.

Разработка на участке ведётся с 2020 года. Расположение всех добывающих скважин в чисто нефтяной зоне позволило получить входные дебиты нефти со средней обводнённостью 10 %. Ввод

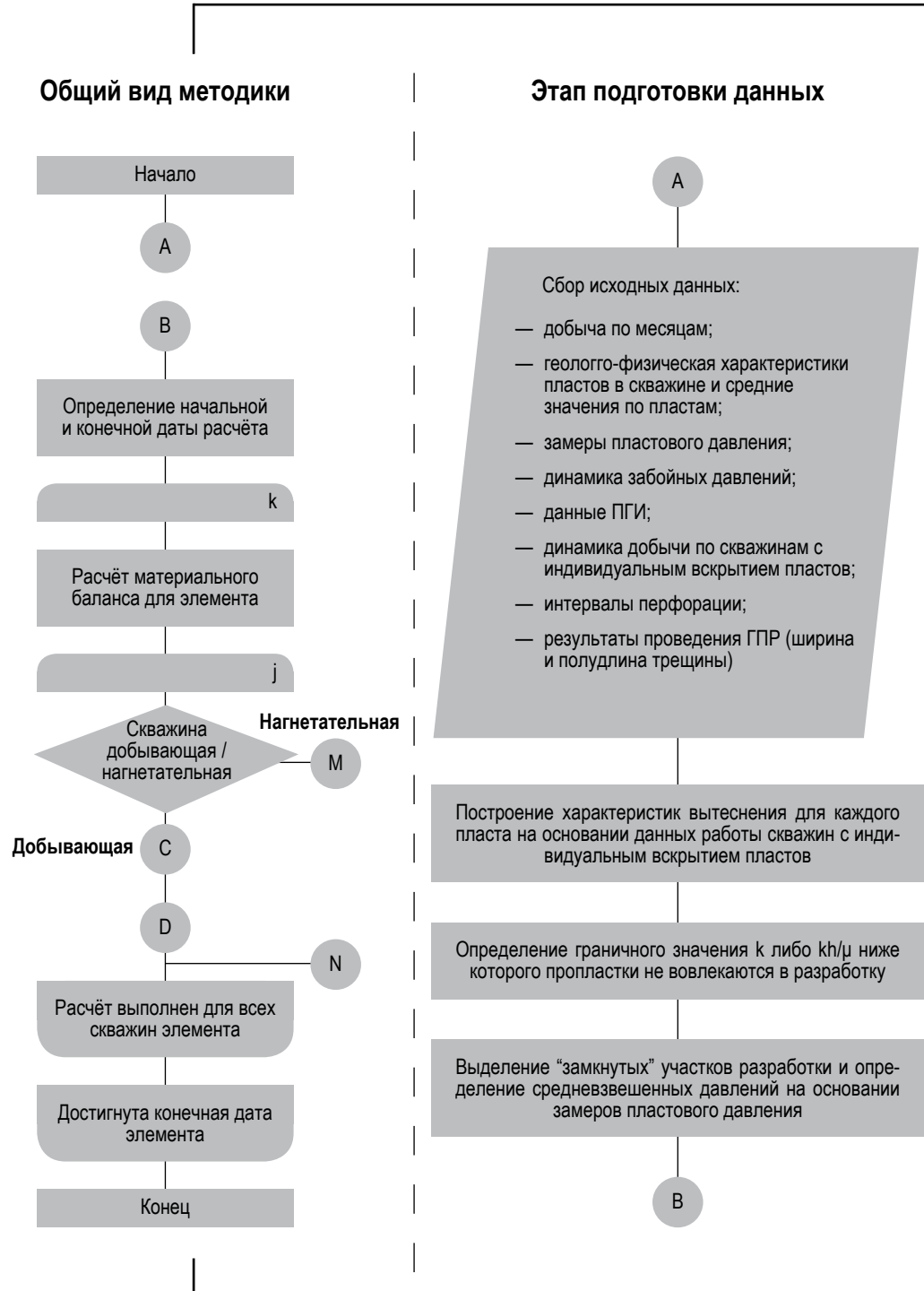
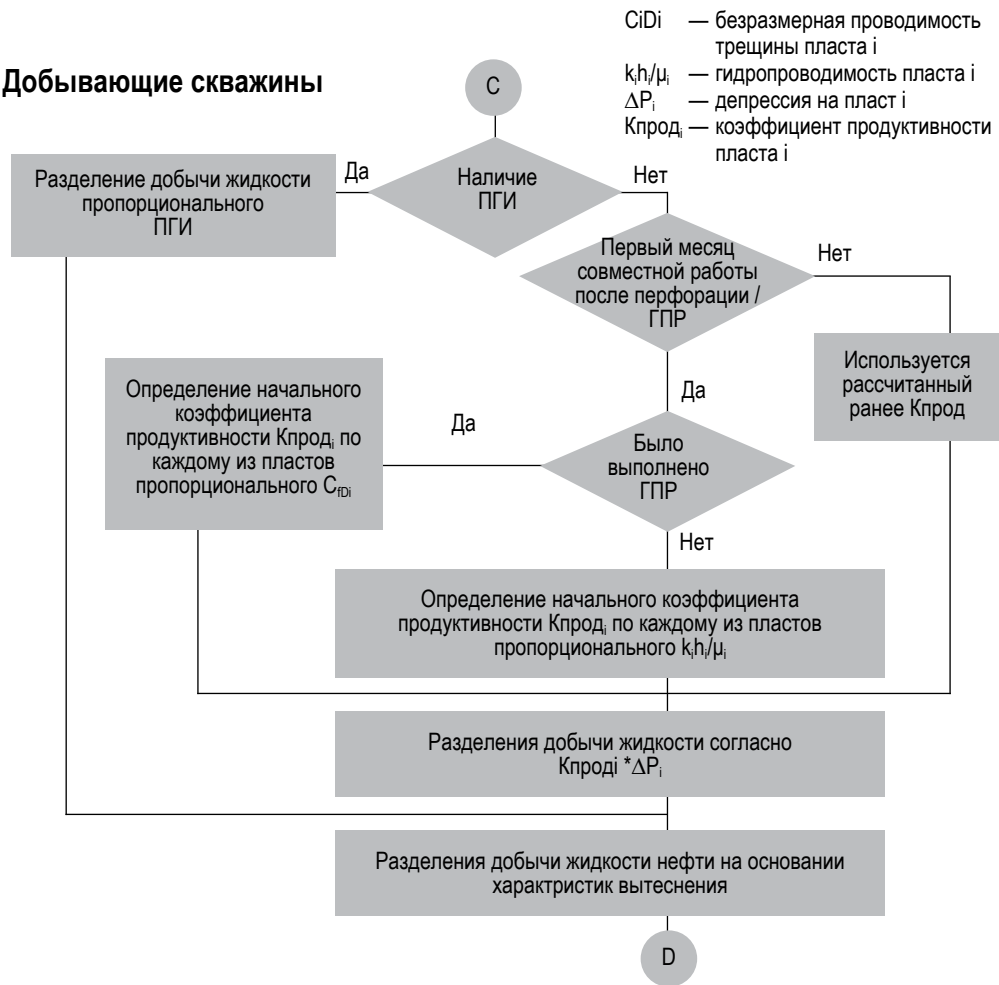


Рис 3. Блок-схема методики разделения добычи нефти, жидкости и закачки.
Источник: составлено автором.

Добывающие скважины



Нагнетательные скважины

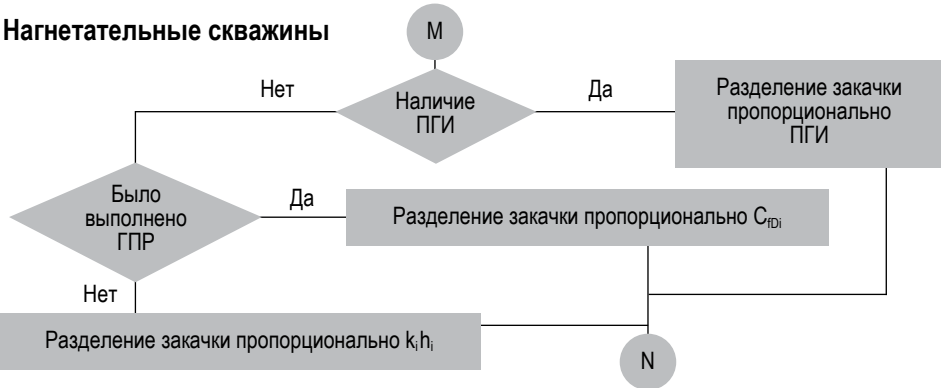


Fig. 3. Flow chart of the technique for oil, liquid production and injection allocation.

Source: compiled by the author.

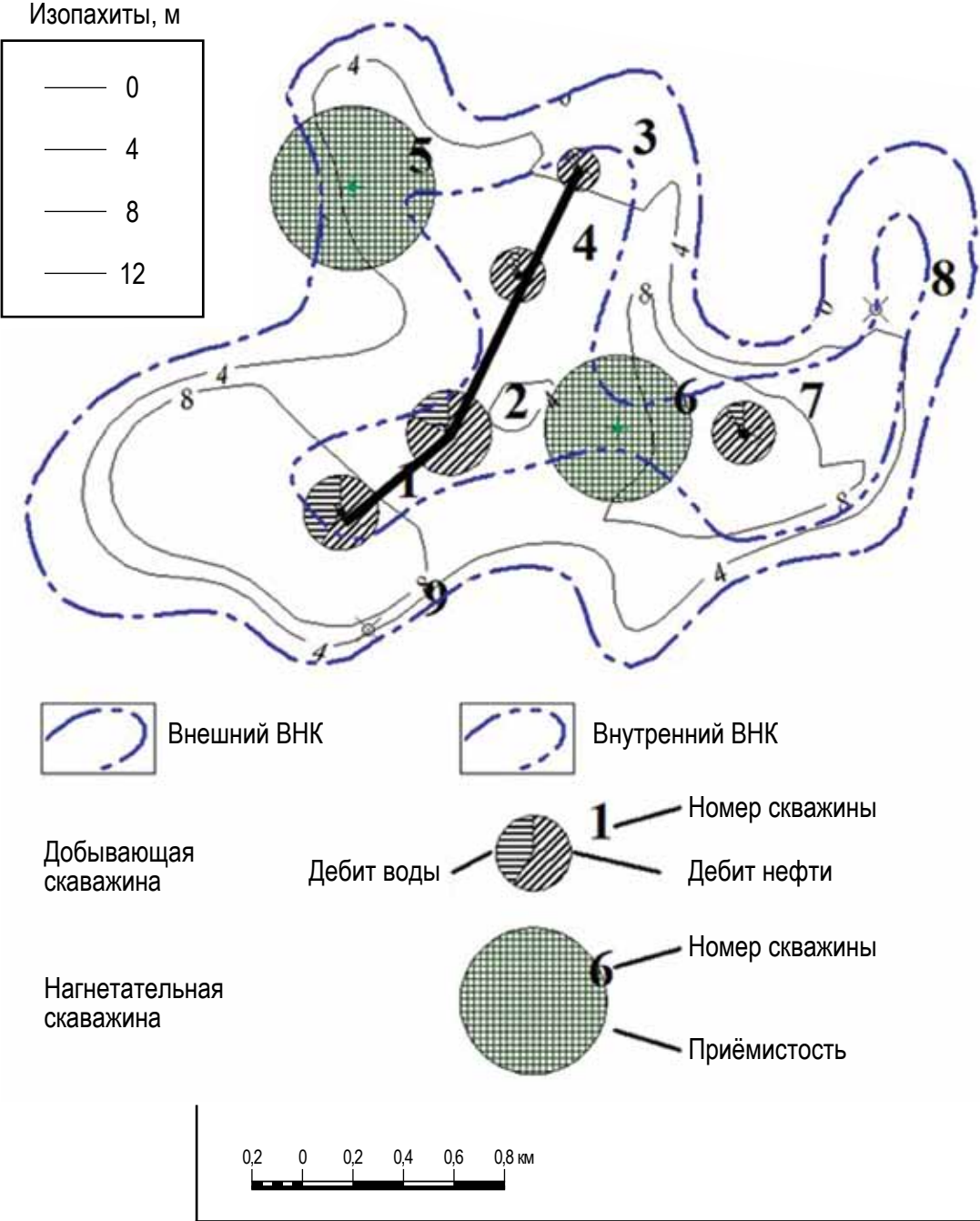


Рис. 4. Участок апробации методики.
Источник: составлено автором.

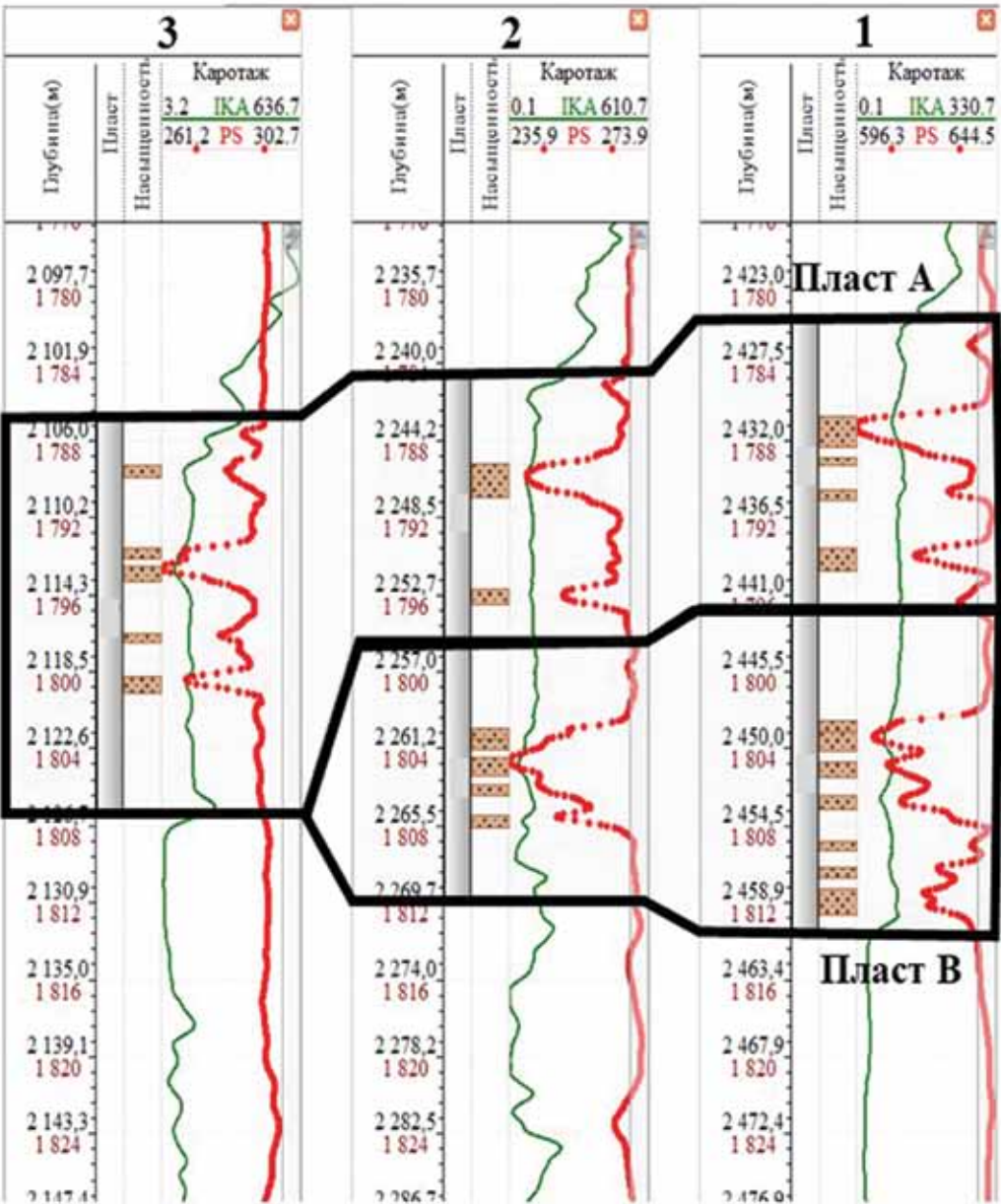


Fig. 4. Section for testing the technique
Source: compiled by the author.

всех скважин был выполнен с проведением гидроразрыва пласта со средней массой пропанта – 50 т. Исключением стала скважина 5 освоенная под нагнетание без выполнения гидроразрыва.

Для построения характеристик вытеснения по пластам А и В были отобраны скважины с индивидуальным вскрытием каждого из пластов на соседнем участке объекта, разрабатываемом более 10 лет. Были применены часто используемые в практике характеристики вытеснения: Сипачёва-Пасевича, Ткаченко, Пирвердяна, Сазонова. Наилучшее качество аппроксимации достигнуто при использовании характеристики Сипачёва-Пасевича ($R^2 = 0.998$ для пласта А и $R^2 = 0.999$ для пласта В).

Полученное в результате расчёта разделение добычи нефти, жидкости и закачки приведено в таблице 3. На основании полученного разделения можно сделать вывод, что выработка запасов по обоим пластам происходит равномерно. Текущее значение обводнённости соответствует отбору от начальных извлекаемых запасов, характеристика выработки благоприятная.

Следует отметить, что закачка воды в пласты осуществляется непропорционально отборам, 79,3 % закачки приходится на пласт А, текущая компенсация при этом составляет 159,8 %. В ходе решения уравнения материального баланса установлено, что непроизводительная закачка в пласт В составляет 35,3 %, в целом по участку – 28,0 %. Значительный объём непроизводительной закачки вероятно связан с расположением нагнетательной скважины 5 близко к контуру нефтеносности и на удалении 730 м от ближайшей добывающей скважины. Подтверждением низкой эффективности закачки в данную скважину может служить снижение дебитов жидкости скважин 3 и 4 относительно начального и переход скважин в режим накопления.

В случае ухудшения энергетического состояния залежи в будущем, рекомендуется создание дополнительных очагов заводнения, а также применение методов выравнивания профиля приёмистости. Например, СОТ-12 позволяющего создавать потокоотклоняющий экран в глубине пласта и избежать снижения приёмистости скважины [20].

Таблица 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ДОБЫЧИ НЕФТИ, ЖИДКОСТИ И ЗАКАЧКИ НА УЧАСТКЕ АПРОБАЦИИ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ
Table 3. Results of oil, liquid production and injection allocation at the site of testing of the improved technique

Пласт	Разделение добычи нефти, %	Отбор от начальных извлекаемых запасов нефти, %	Текущая обводнённость, %	Разделение добычи жидкости, %	Разделение закачки воды, %	Компенсация текущая, %	Компенсация текущая накопленная, %	Непроизводительная закачка, %
A	61,1	30	32	58,7	79,3	159,8	86,4	35,3
B	38,9	21	13	41,3	20,7	58,5	32,8	0
A+B	100,0	26	22	100,0	100,0	115,1	64,6	28,0

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

Заключение

1. Задача разделения добычи нефти, жидкости и закачки при совместной разработке двух и более пластов является сложной, комплексной и на данный момент не имеет единого и удовлетворительного решения.
2. Предложена усовершенствованная методика разделения добычи нефти, жидкости и закачки, учитывающая изменение пластового давления, интервалов перфорации, продуктивности пластов, распространение трещин гидроразрыва пласта, а также различный характер обводнения пластов.
3. Усовершенствованная методика апробирована на одном из месторождений Западной Сибири, где для совместной разработки объединены два нефтяных пласта. Выполнено разделение добычи нефти, жидкости и закачки в каждой скважине за весь период разработки, определена выработка запасов по пластам, установлено наличие непроизводительной закачки на участке апробации методики.

Список источников

1. Янин А. Н. Проблемы разработки нефтяных месторождений Западной Сибири. Тюмень: ГИП предприятие «Зауралье», 2010. 524 с.
2. Методика раздельного учёта добычи нефти для совместно разрабатываемых пластов с использованием данных промышленной геофизики и гидродинамического моделирования / М. Ю. Данько, А. Н. Шандрыгин, А. О. Дроздов [и др.] // Геология и недропользование. 2022. № 3 (7). С. 74–83.
3. Габдуллина А. Р., Дядянин А. В., Малюшко Д. С. Исследование профиля притока в вертикальных и горизонтальных скважинах: Материалы Международной (заочной) научно-практической конференции (Прага, Чехия, 28 ноября 2017 года). Нефтекамск: Научно-издательский центр «Мир науки», 2017. С. 62–67.
4. Schafer D. Geochemical Oil Fingerprinting – Implications for Production Allocations at Prudhoe Bay Field, Alaska. SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver 2011, RPTC 2011 // SPE RPTC. 2011. P. 1–18. <https://doi.org/10.2118/146914-MS>
5. England W. A. Reservoir geochemistry – a reservoir engineering perspective // Journal of petroleum science and engineering. 2007. No. 58. P. 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.12.012>
6. Bennet B., Adams J., Larter S. R. Oil fingerprinting for production allocation: exploiting the natural variations in fluid properties encountered in heavy oil and oil sand reservoirs // Frontiers + Innovation. 2009. P. 157–160.
7. Применение методов резервуарной геохимии при оценке вклада в добываемую продукцию каждого из двух совместно эксплуатирующихся пластов, содержащих разные по молекулярному составу нефти / А. Я. Куклинский, С. Ю. Штунь, А. Н. Морошкин [и др.] // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2021. № 1 (349). С. 39–43. [https://doi.org/10.33285/2413-5011-2021-1\(349\)-39-43](https://doi.org/10.33285/2413-5011-2021-1(349)-39-43)
8. Русских Е. В., Муринов К. Ю. Применение хроматографического анализа для сопоставления составов нефтей и разделения добычи скважин, эксплуатирующих многопластовые объекты // Нефтяное хозяйство. 2017. № 10. С. 28–32. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-10-28-32>
9. Сорокин А. В., Войтов О. В., Мулявин С. Ф. Аналитическая методика раздела продукции по совместным скважинам //

- Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2008. № 4. С. 34–39.
10. Аналитическая методика раздела продукции по совместным скважинам / А. В. Сорокин, О. В. Войтов, Н. Р. Криво-ва, С. Ф. Мулявин // Геология, геофизика и разработка неф-тяных и газовых месторождений. 2008. № 5. С. 43–47.
 11. Onwunlyili C. C., Onyekonwu M. O. Coupled Model for Analy-sis of Multilayer Reservoir in Commingled Production // SPE the Nigeria Annual International Conference. 2013. P. 1–9. <https://doi.org/10.2118/167588-MS>
 12. Грезин А. В. Подходы к распределению отборов и закачки по совместно эксплуатируемым пластам многопластового мес-торождения // Нефтепромысловое дело. 2020. № 10. С. 60–67. [https://doi.org/10.30713/0207-2351-2020-10\(622\)-60-69](https://doi.org/10.30713/0207-2351-2020-10(622)-60-69)
 13. Разработка программы для реализации методики раз-деления добычи нефти и жидкости при совместной экс-плуатации двух и более пластов / С. Ф. Мулявин, Н. Р. Нещадинов, Д. Р. Валеева, А. А. Никеров // Нефтепро-мысловое дело. 2023. № 9 (657). С. 30–37. [https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-9\(657\)-30-37](https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-9(657)-30-37)
 14. Мулявин С. Ф., Маслов В. Н. Геология и разработка нефтя-ных и газовых месторождений Западной Сибири. Часть I: монография. Тюмень: ТИУ, 2016. 264 с.
 15. Методика оценки зон локализации запасов многопла-стового объекта разработки аналитическим методом / Д. Р. Гильмиев, А. П. Коваленко, Е. А. Хребтова [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2022. № 11. С. 32–36. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-11-32-36>
 16. Баишеев Б. Т., Исайчев В. В., Оганджянц Б. Г. Методы прогноза технологических показателей процесса обводне-ния по обобщенным характеристикам вытеснения // Не-фтяное хозяйство. 1971. № 10. С. 34–39.
 17. Камбаров Г. С., Алмамедов Д. Г., Махмудов Т. Ю. К опреде-лению начального извлекаемого запаса нефтяного место-рождения // Азербайджанское нефтяное хозяйство. 1974. № 3. С. 22–24.
 18. Меркулова Л. И., Гинзбург А. А. Графические методы ана-лиза при добыче нефти. М.: Недра, 1986. 125 с.
 19. Назаров Н. С., Сипачев Н. В. Методика прогнозирования технологических показателей поздней стадии разработки нефтяных залежей // Известия высших учебных заведе-ний. Серия «Нефть и газ». 1972. № 110. С. 41–45.

20. Расширение области эффективного применения химических методов увеличения нефтеотдачи в низкопроницаемых коллекторах на примере Повховского месторождения ТПП «Повхнефтегаз» / Р. Р. Махмутов, Ф. С. Салимов, В. В. Макиенко, Д. А. Астафьев // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2016. № 11. С. 81–83.

References

1. Yanin AN. Problems of Oil Field Development in Western Siberia. Tyumen, State Research Institute "Zauralye" Enterprise; 2010. 524 p. (In Russ.).
2. Danko MYu, Shandrygin AN, Drozdov AO, Salikhov MR, et al. Methodology for Separate Accounting of Oil Production for Jointly Developed Reservoirs Using Production Geophysics and Hydrodynamic Modeling Data. Geology and subsoil use. 2022;3(7):74-83. (In Russ.).
3. Gabdullina AR, Dyadyanin AV, Malyushko DS. Study of the inflow profile in vertical and horizontal wells: proceedings of the international (online) scientific and practical conference, Prague, Czech Republic, November 28, 2017. Neftekamsk: Scientific Publishing Center "World of Science"; 2017;62-67 p. (In Russ.).
4. Schafer D. Geochemical Oil Fingerprinting - Implications for Production Allocations at Prudhoe Bay Field, Alaska. SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Denver 2011, RPTC 2011. SPE RPTC. 2011;1-18. <https://doi.org/10.2118/146914-MS>
5. England WA. Reservoir geochemistry - a reservoir engineering perspective. Journal of petroleum science and engineering. 2007;(58):344-354. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.12.012>
6. Bennet B, Adams J, Larter SR. Oil fingerprinting for production allocation: exploiting the natural variations in fluid properties encountered in heavy oil and oil sand reservoirs. Frontiers + Innovation. 2009;157-160.
7. Kuklinsky AY, Shtun SYu, Moroshkin AN, Ermolovsky AV. Applying reservoir geochemistry methods to determine performance of each of jointly operated formations with different oil molecular composition. Geology, geophysics and development of oil and gas fields. 2021;1(349):39-43. (In Russ.). [https://doi.org/10.33285/2413-5011-2021-1\(349\)-39-43](https://doi.org/10.33285/2413-5011-2021-1(349)-39-43)
8. Russkikh EV, Murinov KYu. Using the chromatographic analysis for comparison of oil compositions and separation of pro-

- duction of wells, exploiting multilayer objects. Oil industry. (In Russ.). 2017;(10):28-32. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-10-28-32>
9. Sorokin AV, Voitov OV, Mulyavin SF. Analytical methodology for division of production by joint wells. News of higher educational institutions. Oil and gas studies. 2008;(4):34-39. (In Russ.).
 10. Sorokin AV, Voitov OV, Krivova NR, Mulyavin SF. Analytical methodology for sharing production in joint wells. Geology, geophysics and development of oil and gas fields. 2008;(5):43-47. (In Russ.).
 11. Onwunyili CC, Onyekonwu MO. Coupled Model for Analysis of Multilayer Reservoir in Commingled Productio. SPE the Nigeria Annual International Conference. 2013;1-9. <https://doi.org/10.2118/167588-MS>
 12. Grezin AV. Approaches to distribution of samples and injection in jointly operated formations of a multi-layer field. Oil-field engineering. 2020;(10):60-67. (In Russ.). [https://doi.org/10.30713/0207-2351-2020-10\(622\)-60-69](https://doi.org/10.30713/0207-2351-2020-10(622)-60-69)
 13. Mulyavin SF, Neshchadimov NR, Valeeva DR, Nikerov AA. Development of a program for the implementation of a methodology for separating oil and liquid production during joint operation of two or more formations. Oilfield engineering. 2023;9(657):30-37. (In Russ.). [https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-9\(657\)-30-37](https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-9(657)-30-37)
 14. Mulyavin SF, Maslov VN. Geology and development of oil and gas fields in Western Siberia. Part I: monograph. Tyumen: TIU; 2016. 264 p. (In Russ.).
 15. Gilmiev DR, Kovalenko AP, Khrebtova EA, Yagudin RA, et al. Methodology for assessing the localization zones of reserves of a multi-layer development object using an analytical method. Neftanoe hozajstvo = Oil Industry. 2022;(11):32-36. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-11-32-36>
 16. Baishee BT, Isaichev VV, Ogandzhanyants BG. Methods for predicting technological indicators of the flooding process based on generalized displacement characteristics. Neftanoe hozajstvo = Oil industry. 1971;(10):34-39. (In Russ.).
 17. Kambarov GS, Almamedov DG, Makhmudov TYu. On the determination of the initial recoverable reserve of an oil field. Azerbaijan Oil Industry Journal. 1974;(3):22-24. (In Russ.).
 18. Merkulova LI, Ginzburg AA. Graphic methods of analysis in oil production. Moscow: Nedra; 1986. 125 p. (In Russ.).
 19. Nazarov NS, Sipachev NV. Methodology for forecasting tech-

nological indicators of the late stage of oil deposit development. News of higher educational institutions. Oil and gas studies. 1972;(110):41-45. (In Russ.).

20. Makhmutov RR, Salimov FS, Makienko VV, Astafiev DA. Expansion of the area of effective application of chemical methods for enhancing oil recovery in low-permeability reservoirs using the example of the Povkhovskoye field of the Povkhneftegaz TPP. Geology, geophysics and development of oil and gas fields. 2016;(11):81-83. (In Russ.).

Информация об авторе

Роман Александрович Нещади́мов – инженер 1-й категории отдела проектирования, мониторинга и нейросетевой оптимизации разработки Южно-Ягунской группы месторождений, ЛУКОЙЛ-Инжиниринг, Researcher ID: MGU-8674-2025

Information about the author

Roman A. Neshchadimov – 1st Category Engineer of the Department of Design, Monitoring and Neural Network Optimization of the Development of the Yuzhno-Yagunsky Group of Fields, LUKOIL-Engineering, Researcher ID: MGU-8674-2025



НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал
Северо-Кавказского федерального
университета

ISSN 2308–4758

Выпуск №2, 2025 г.



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

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

Подписано в печать 20.06.2025 г. Выход в свет 30.06.2025 г.
Формат 70 × 108 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага
офсетная. Усл. печ. л. 17,33. 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.