

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 № 3, 2023 г.

Выходит 4 раза в год

	«Наука. Инновации. Технологии» Научный журнал Северо-Кавказского федерального университета
Учредитель	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет»
Главный редактор:	д.г.н., проф. Белозеров В.С.
Заместитель главного редактора:	д.г.н., проф. Щитова Н.А.
Международный редакционный совет:	Абшаев М.Т., д-р физ.-мат. наук, профессор (Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик); Воробьева О.Д., д-р экон. наук, профессор (Московский государственный университет, г. Москва); Гасумов В.А., д-р техн. наук, профессор (Азербайджанский технический университет, г. Баку); Лиховид А.А., д-р геогр. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Герасименко Т.И., д-р геогр. наук, профессор (Оренбургский гос. университет, г. Оренбург); Диневич Л.А., д-р физ.-мат. наук, профессор (Тель-Авивский университет, г. Тель-Авив); Жакин А.И., д-р физ.-мат. наук, профессор (Юго-Западный гос. университет, г. Курск); Зырянов А.И., д-р геогр. наук, профессор (Пермский государственный университет, г. Пермь); Ибрагимов А.И., д-р геогр. наук, профессор (Эгейский университет, Турция, г. Измир); Хани А.А.К., канд. техн. наук, профессор (Иорданский университет науки и технологии, Ирбид); Коляда А.А., д-р физ.-мат. наук, доцент (Белорусский гос. университет, г. Минск); Молодикова И.Н., канд. геогр. наук (Центрально-Европейский университет, г. Вена); Нефедова Т.Г., д-р геогр. наук, вед. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва); Панин А.Н., к. геогр. н., доц. (Московский государственный университет, г. Москва); Рязанцев С.В., член-корреспондент РАН, д. экон. наук, профессор (Институт социально-политических исследований РАН, г. Москва); Тикунов В.С., д-р геогр. наук, профессор (Московский государственный университет, г. Москва)
Редакционная коллегия:	Белозеров В.С., д-р геогр. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Бекетов С.Б., д-р техн. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Беляев Н.Г., д-р биол. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Гасумов Р.А., д-р техн. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Керимов А.Г., д-р техн. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь); Губарева Л.И., д-р биол. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Джандарова Т.И., д-р биол. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь); Диканский Ю.И., д-р физ.-мат. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Ерин К.В., д-р физ.-мат. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Закинян А.Р., д-р физ.-мат. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь); Закинян Р.Г., д-р физ.-мат. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Котти Б.К., д-р биол. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Лукьянов В.Т., д-р техн. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь); Лысенко А.В., д-р геогр. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь); Полян П.М., д-р геогр. наук, вед. науч. сотрудник РАН (ИГ РАН, г. Москва); Разумов В.В., д-р геогр. наук, профессор (главный научный сотрудник ОАО «Российские космические системы», г. Москва); Тимченко Л.Д., д-р ветеринар. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Толпаев В.А., д-р физ.-мат. наук, доцент (СКФУ, г. Ставрополь); Федорова Н.Г., д-р техн. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Шальнев В.А., д-р геогр. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Щитова Н.А., д-р геогр. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Соловьев И.А. (к. геогр. н., доцент (СКФУ, г. Ставрополь); Мишвелов Е.Г., д-р биол. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Бадов А.Д., д-р геогр. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь); Харченко В.М., д-р геол.-минерал. наук, профессор (СКФУ, г. Ставрополь)
Ученый секретарь:	к. геогр. н., доц. Соловьев И.А.
Свидетельство о регистрации	ПИ №ФС77–52723 от 8.02.2013
Подписной индекс	Объединённый каталог. ПРЕССА РОССИИ. Газеты и журналы: 94011
Журнал	включен в БД «Российский индекс научного цитирования», перечень ВАК. Журнал «Вестник Ставропольского государственного университета» перерегистрирован в журнал «Наука. Инновации. Технологии» в связи с переименованием учредителя
Адрес	355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1
Телефон	(8652) 33–07–32
Сайт	www.ncfu.ru
E-mail	nit_ncfu@mail.ru
ISSN	2308–4758
DOI	https://doi.org/10.37493/2308-4758.0

	«Science. Innovations. Technologies» North Caucasus Federal University
Founder	Federal State Autonomous Educational Institution for Higher Education "North-Caucasus Federal University"
Chief Editor:	Doctor of Geographical Sciences, prof. Belozеров V.S.
Deputy Chief Editor:	Doctor of Geographical Sciences, prof. Shchitova N.A.
International Editorial Board:	Abshaev M.T., Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor (High Mountain Geophysical Institute, Nalchik); Vorobieva O.D., Doctor of Economics Sciences, Professor (Moscow State University, Moscow); Gasumov V.A., Dr. of techn. sciences, professor (Azerbaijan Technical University, Baku); Likhovid A.A., Dr. of Geogr. Sciences, professor (NCFU, Stavropol); Gerasimenko T.I., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (Orenburg State University, Orenburg); Dinevich L.A., Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor (Tel Aviv University, Tel Aviv); Zhakin A.I., Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor (South-West State University, Kursk); Zyryanov A.I., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (Perm State University, Perm); Ibragimov A.I., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (Aegean University, Turkey, Izmir); Hani A.A.K., Cand. of Tech. Sciences, Professor (Jordan University of Science and Technology, Irbid); Kolyada A.A., Doctor of Phys.-Math. Sciences, Associate Professor (Belarusian State University, Minsk); Molodikova I.N., Cand. of Geogr. Sciences (Central European University, Vienna); Nefedova T.G., Dr. of Geogr. Sciences, led. scientific. RAS employee (IG RAS, Moscow); Panin A.N., Ph.D. of Geographical Sciences, Associate Professor (Moscow State University, Moscow); Ryazantsev S.V., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Economics Sciences, Professor (Institute of Social and Political Research RAS, Moscow); Tikunov V.S., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (Moscow State University, Moscow); Kharchenko V.M., Doctor of Geol.-Mineral. Sciences, Professor (NCFU, Stavropol)
Editorial team:	Belozеров V.S., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (NCFU, Stavropol); Beketov S.B., Dr. of techn. sciences, Professor (NCFU, Stavropol); Belyaev N.G., Dr. of Biol. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Gasumov R.A., Dr. of techn. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Kerimov A.G., Dr. of Techn. Sciences, Associate Professor (NCFU, Stavropol); Gubareva L.I., Dr. of Biol. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Dzhandarova T.I., Dr. of Biol. Sciences, Associate Professor (NCFU, Stavropol); Dikansky Yu.I., Dr. of Phys.-Math. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Erin K.V., Dr. of Phys.-Math. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Zakinyan A.R., Dr. of Phys.-Math. Sciences, Associate Professor (NCFU, Stavropol); Zakinyan R.G., Dr. of Phys.-Math. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Kotti B.K., Dr. of Biol. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Lukyanov V.T., Dr. of Techn. Sciences, Associate Professor (NCFU, Stavropol); Lysenko A.V., Dr. of Geogr. Sciences, Associate Professor (NCFU, Stavropol); Polyay P.M., Dr. of Geogr. Sciences, led. scientific. RAS employee (IG RAS, Moscow); Razumov V.V., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (Chief Researcher of JSC Russian Space Systems, Moscow); Timchenko L.D., Dr. of Veterinary Medicine. sciences, professor (NCFU, Stavropol); Tolpaev V.A., Doctor of Phys.-Math. Sciences, Associate Professor (NCFU, Stavropol); Fedorova N.G., Dr. of Techn. Sciences, Professor (NCFU, Stavropol); Shalnev V.A., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (NCFU, Stavropol); Shchitova N.A., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (NCFU, Stavropol); Soloviev I.A., Ph.D. of Geographical Sciences, Associate Professor (NCFU, Stavropol); Mishvelov E.G., Doctor of Biological Sciences, Professor (NCFU, Stavropol); Badov A.D., Dr. of Geogr. Sciences, Professor (NCFU, Stavropol); Kharchenko V.M., Doctor of Geol.-Mineral. Sciences, Professor (NCFU, Stavropol)
Scientific Secretary:	Ph. D. of Geographical Sciences, Associate Professor Soloviev I.A.
Certificate	ПМ № ФС77–52723 dated February 8th 2013
The Index	The Journal is included in the DB «Russian index of the scientist quoting» The Journal is included in the DB «Russian index of the scientist quoting». The journal «Bulletin of the Stavropol state University» renamed in the journal «Science. Innovations. Technologies» due to renaming of the founder
Address	355017, Stavropol, Pushkin street, 1
Phone	(8652) 33–07–32
Site	www.ncfu.ru
E-mail	nit_ncfu@mail.ru
ISSN	2308–4758
DOI	https://doi.org/10.37493/2308-4758.0

СОДЕРЖАНИЕ

«НАУКА. ИННОВАЦИИ. ТЕХНОЛОГИИ», № 3, 2023

1.6.	НАУКИ О ЗЕМЛЕ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ	
1.6.13.	Экономическая, социальная, политическая и рекреационная география (географические науки) Супрунчук И.П., Чихичин В.В. Звуковое пространство городов-курортов Кавказских Минеральных Вод.	7
	Suprunchuk I.P., Chikhichin V.V. Soundscape of Resort Towns in Caucasus Mineral Waters	8
1.6.18.	Науки об атмосфере и климате (физико-математические науки) Афанасьев И. С., Закинян Р. Г., Аджиева А. А. Внутригодовая изменчивость температуры приземного воздуха и её моделирование для города Ставрополя	23
	Afanasyev I. S., Zakinyan R. G., Adzhieva A. A. Intra-annual Variability of Surface Air Temperature and Its Modeling for the City of Stavropol	24
	Аджиев А. Х., Кондратьева Н. В., Юрченко Н. В., Шидугов И. Ж. Многолетняя динамика снежного покрова в Приэльбрусье	47
	Adzhiev A. Kh., Kondratieva N. V., Yurchenko N. V., Shidugov I. Zh. Long-Term Dynamics of Snow Cover in the Elbrus Region	48

	Антонов С. А., Перегудов С. В.	
Сравнение цифровых моделей рельефа.		65
	Antonov S.A., Peregudov S.V.	
Comparison of Digital Relief Models		66
1.6.21.	Геоэкология	
	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		87
	Razumov V. V., Fedchenko L. M., Razumova N. V., Bogdanova N. D., Shalnev V. A.	
The Extent of the Spread and Activity of the Manifestation of Avalanche-Talus Processes in the Karachay-Cherkess Republic		88
2.8.	НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ И ГОРНЫЕ НАУКИ	
2.8.4.	Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений	
	Курин К. К., Загородских И. А.	
Опыт адаптации многопластовой гидродинамической модели Ныдинского участка Медвежьего месторождения		113
	Kurin K. K., Zagorodskih I. A.	
An Experiment in History Matching of the Multi-Reservoir Hydrodynamic Model of the Nydinsky Section of the Medvezhye Field		114

2.8.4.	Разработка и эксплуатация нефтяных Мулявин С.Ф., Бяков А.В., Нещади́мов Р.А. Особенности разработки нефтега- зоконденсатного месторождения Томской области	137
	Mulyavin S.F., Byakov A.V., Neshchadimov R.A. Features of the Development of Oil and Gas Condensate Field in the Tomsk Region	138

1.6.13.
УДК 910.1
DOI:

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ, СОЦИАЛЬНАЯ, ПОЛИТИЧЕСКАЯ
И РЕКРЕАЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ (ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ НАУКИ)
10.37493/2308-4758.2023.3.1

Супрунчук И.П.,
Чихичин В.В.

Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь, Россия

**ЗВУКОВОЕ ПРОСТРАНСТВО
ГОРОДОВ-КУРОРТОВ
КАВКАЗСКИХ МИНЕРАЛЬНЫХ ВОД**

Введение.

В статье исследуется звуковое пространство городов-курортов Кавказских Минеральных Вод на примере двух крупнейших из них – Пятигорска и Кисловодска. Рассмотрено понятие «звуковое пространство города», выделены основные современные аспекты исследований звука в городе. На собранных полевых данных предпринимается попытка качественной оценки звуковой среды городов, особенно важной для курортных городов. Для центральных частей городов проведена дифференциация звукового пространства, отражающая тип социального использования территорий.

Материалы и методы исследований.

Данные полевых измерений звука в городах получены в ходе полевой практики студентов-географов по экономической и социальной географии в 2022 году. В ходе исследования применяются картографический метод, нормативный подход и типология.

Результаты исследований и их обсуждение.

Звуковое пространство исследуемых городов-курортов имеет типичные особенности современных российских городов. Курортная функция в звуковом пространстве не отражается. Главными факторами его формирования являются транспортные магистрали, человеческая и коммерческая деятельность. Рекреационные зоны в звуковом отношении комфортнее, имея свою внутреннюю специфику. В целом, уровень шумового загрязнения зависит от видов преобладающих звуков на территории. Микрогеографическое исследование центральных курортных частей городов показало полное отсутствие понимания и требований к звуковому комфорту.

Выводы.

В городских исследованиях происходит увеличение интереса к звуку в городе, выделение звукового пространства и его культурно-географических различий. Звук может выделить универсальные социокультурные структуры, выступать источником концептуальных и методологических построений. Звуковые исследования помогают осмысливать существующие социальные практики и их контексты. Курортные города Кавказских Минеральных Вод создавались без учета комфорта звуковой среды. В результате характеристики их звукового пространства не отличаются от обычных городов.

Ключевые слова:

звуковое пространство, города-курорты, Кавказские Минеральные Воды, шумовое загрязнение, исследования звука.

Suprunchuk I.P., North Caucasus Federal University,
Chikhichin V.V. Stavropol, Russia

Soundscape of Resort Towns in Caucasus Mineral Waters

Introduction. The article investigates the sound space of resort towns in Caucasus Mineral Waters by the example of the two largest of them, namely Pyatigorsk and Kislovodsk. The concept of the sound space of the city is considered, the main modern aspects of sound research in the city are highlighted. Based on the collected field data, an attempt is made to qualitatively assess the sound environment of cities, especially important for resort towns. For the central parts of the cities, the differentiation of the sound space was carried out, reflecting the type of social use of the territories.

Materials and research methods. The data of field measurements of sound in cities were obtained during the field practice of geography students in socio-economic geography in 2022. The cartographic method, normative approach and typology are used in the course of the study.

Research results and their discussion. The sound space of the studied resort towns has typical features of modern Russian cities. The resort function is not reflected in the sound space. The main factors of its formation are transport highways, human and commercial activities. Recreational areas are more comfortable in terms of sound, having their own internal specifics. In general, the level of noise pollution depends on the types of prevailing sounds in the territory. A microgeographic study of the central resort parts of the cities showed a complete lack of understanding and requirements for sound comfort.

Conclusions. In urban studies, there is an increase in interest in sound in the city, the allocation of sound space and its cultural and geographical differences. Sound can identify universal socio-cultural structures, act as a source of conceptual and methodological constructions. Sound studies help comprehend existing social practices and their contexts. The resort towns of the Caucasus Mineral Waters were founded without taking into account the comfort of the sound environment. As a result, the characteristics of their sound space do not differ from ordinary cities.

Keywords: soundscape, resort cities, Caucasus Mineral Waters, noise pollution, sound studies

Введение

Проблема исследования звука в городе в общественных науках появилась относительно недавно во второй половине XX века. Многие ее составляющие и аспекты находятся в стадии научного осмысления и поиска исследовательских подходов. Городская среда состоит не только из физических объектов и их визуального оформления, но и генерирует множество чувственных восприятий, среди которых одним из важнейших является звук. В российской географической науке звук представляется только через один концепт под названием «шумовое загрязнение». Уровень шума можно достаточно точно измерить, провести по нему зонирование территории и сформировать нормативные рекомендации по устранению превышений, если они выявляются. В исследовании такой общей фоновой ситуации, остаются совершенно не изученным качественные характеристики звука в городе. Качественные исследования звука¹ позволяют по-новому взглянуть на механизмы функционирования города, получить уникальные данные о его восприятии разными группами людей. Открывается обширная научная междисциплинарная область звуковых исследований, в которую вносят вклад урбанисты, архитекторы, музыковеды, социологи, инженеры и лингвисты.

Звукоориентированность в сфере градостроительства и управления городским развитием, как в России, так и в зарубежных странах, находится на начальном уровне. В практическом смысле в каждом регионе действуют «Закон о тишине»² и нормативы шумозащиты от транспортной инфраструктуры. С учетом роста городов и постоянного усложнения их внутренней структуры, проектирование их звукового пространства станет в перспективе актуальной задачей. Особенно важна она будет для городов-курортов, так как комфорт и качество звукового окружения формируют условия для

- 1 В зарубежной урбанистике закрепился термин «sound studies».
- 2 Закон Ставропольского края от 28 декабря 2010 г. № 117-КЗ «О некоторых мерах по обеспечению тишины, покоя граждан и общественного порядка».

полноценного отдыха людей. Среди всех таких городов, особенно нуждаются в здоровой звуковой среде города-курорты лечебно-оздоровительного типа, такие как города Кавказских Минеральных Вод (КМВ). Звук в них должен выступать элементом объемной рекреационной среды, которая эффективно восстанавливает здоровье отдыхающих.

Материалы и методы исследований

Традиционно звук в городе исследовался как физическое явление с точки зрения опасности для здоровья человека. Лишь с середины 1970-х гг., звук стал рассматриваться как явление социальное благодаря работам Р.М. Шейфера. Он сформулировал исследовательскую задачу, заключающуюся во «вслушивании» в городскую среду, и предложил термин «soundscape» для обозначения звуковой среды, в которой находится слышащий субъект [12].

Главные факторы, вызвавшие интерес к исследованию звука, были связаны с активной урбанизацией. Ее звуковые следствия – индустриальные и транспортные шумы, многоголосье и насыщенность территорий звуковыми сигналами, исчезновение звуковой идентичности мест. «Звуковой палимпсест» стал одной из опаснейших угроз для здоровья горожан – как физического (провоцируя кардиологические проблемы, головные боли и т.д.), так и психологического (активируя защитные механизмы человека и заставляя его еще больше игнорировать звуковую среду) [4]. При общей малой изученности городского звукового пространства, в отечественных традициях преобладает широкий градостроительный взгляд [2], с использованием методов социальной антропологии [3].

Объектом исследования в данной работе является звуковое пространство города³. Под ним понимается совокупность звуков, в том числе музыкальных фрагментов, которая регулярно воспроизводится в определенной объективной окружающей среде [7]. В зарубежной гуманитарной науке сформировалось представление о

3 В зарубежных исследованиях – «soundscape» (дословно – звуковой ландшафт).

саунд-стадиз (sound studies) как «междисциплинарном волнении», аналитической отправной или финальной точкой которого является звук. Первостепенным предметом саунд-стадиз, становилось изучение звуковых практик и дискурсов, а также институций, которые их описывают [14].

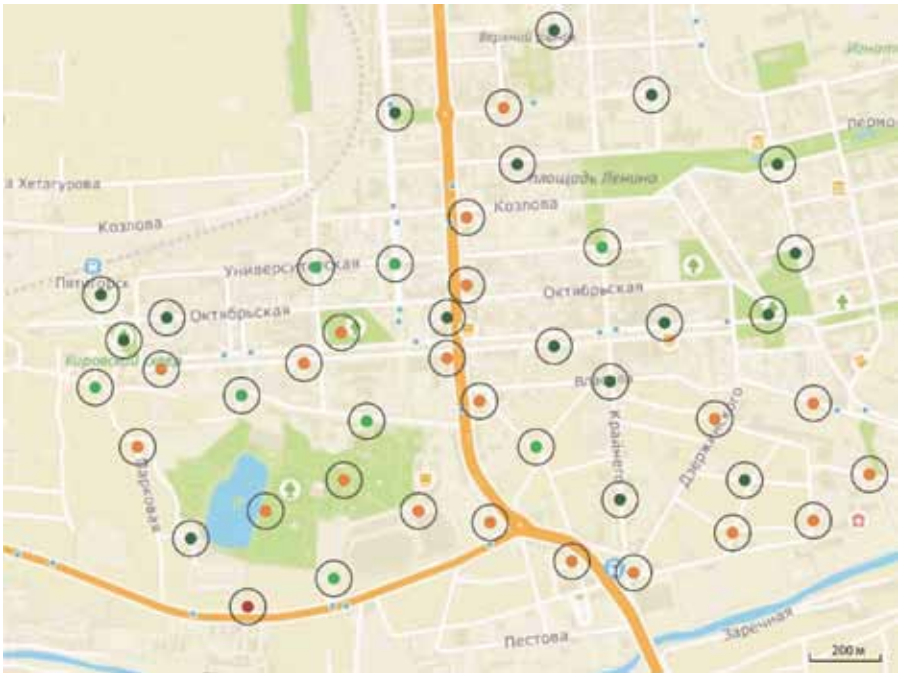
Согласно Р. М. Шаферу, все звуковые явления могут быть разделены на уникальные или доминирующие. Все виды звуков делятся по их генезису на три группы:

- основные звуки;
- предупреждающие звуки или звуки-сигналы;
- звуки, присущие конкретному месту.

К основным звукам относятся природные: шум ветра, леса, насекомых, животных. К звукам-сигналам относятся явления, характерные для того или иного события или процесса: звон колоколов, звук сирены. Звуки, присущие конкретному месту или звуковые ориентиры прочно ассоциативно связаны с функцией конкретной территории [11]. Отличительной особенностью звуковых исследований является их крупный территориальный масштаб. Так, изучение звука может проводиться от двора многоквартирного дома [1], отдельного городского района [5] до города [13] или этнической группы [8].

В данном исследовании изучается звуковое пространство городов-курортов КМВ с двух сторон. С одной стороны, исследуется физическое присутствие звука в городе через измерение уровня шума, выявление закономерностей его территориального распространения и составление условного «шумового каркаса». Для оценки уровня шума использовалась программа Sound Meter Abc Apps на Android, показания которой в свою очередь калибровалась по профессиональному шумомеру Mastech MS6701. Сеть точек измерения прокладывалась по основным улицам городов из расчета 1 точка на 150–200 м. С другой стороны, проводились качественные исследования звука, в ходе которых установленные звуки классифицировались по происхождению, доминированию и сочетанию.

Посредством включенного наблюдения фиксировались виды звуков в разных местах. Виды звуков дифференцированы на кате-



Уровень шума, дБ

- менее 50
- 50–59
- 60–69
- 70 и более

100 м Буферная зона

Рис. 1. Уровень шума в центральной части г. Пятигорска в июне 2022 года.
Fig. 1. Noise level in the central part of Pyatigorsk in June 2022.

гории: трафик (автомобили, малые средства передвижения, поезда, самолеты); природа (вода, деревья, животные); коммерческая деятельность или бизнес (производство, ремонтные работы, реклама); человеческая деятельность (движение, разговор, рекреация).

Результаты исследований и их обсуждение

В практику городских исследований звука прочно вошло представление о звуке как шумовом загрязнении, которое измеримо с помощью специальных приборов и ухудшает комфортность окружающей среды. В рамках этих представлений также закрепились зависимости между объемом транспортной инфраструктурой и высоким уровнем шума. Тогда как в районах со сравнительно низкой плотностью застройки и зелеными зонами уровень шума ниже [10]. Для того чтобы верифицировать эти предположения относительно курортных городов, был исследован уровень шума в центральной части города Пятигорска (рис. 1).

Приуроченность очагов высокого уровня шума к транспортным магистралям действительно наблюдается. Так, почти на всем протяжении главной автомобильной артерии, пересекающей город с севера на юг, – на проспекте Калинина фиксируется звуковое давление более 60 дБ. Однако проявляются и частные особенности, связанные с транспортным городским планированием. Так как проспект Калинина изначально закладывался как скоростная городская магистраль, то в центральной части города он был обустроен в соответствии с санитарно-защитными требованиями – имеются зеленые насаждения, туннель и бетонные стены в районе пересечения с проспектом Кирова. Из-за этого максимальный уровень транспортного шума (71 дБ) зарегистрирован на улице Первомайской, примыкающей к проспекту Калинина с запада и проходящей по жилым кварталам. Следствием транспортной организации центральной части является и повышенный уровень шума на улицах Дзержинского и Бунимовича, сходящихся к проспекту Калинина в районе Центрального автовокзала. Через эти улицы происходит транзит с проспекта в восточную часть города,

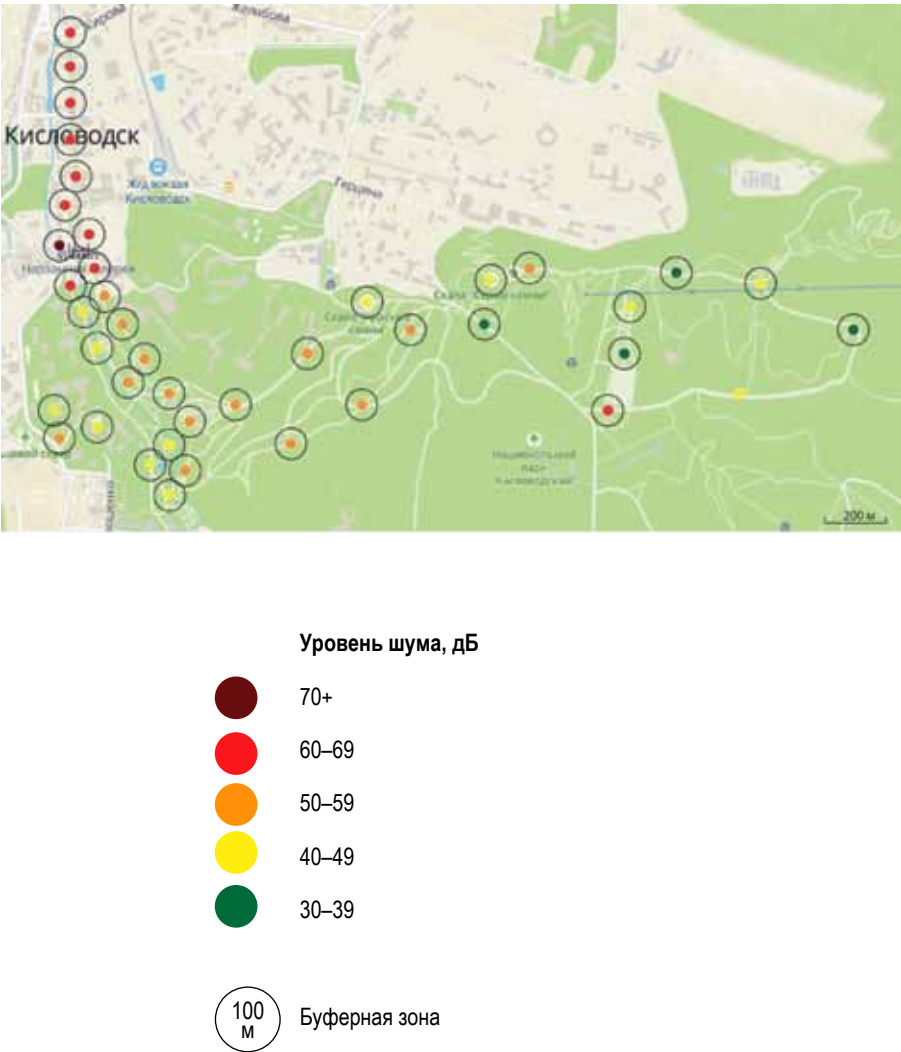


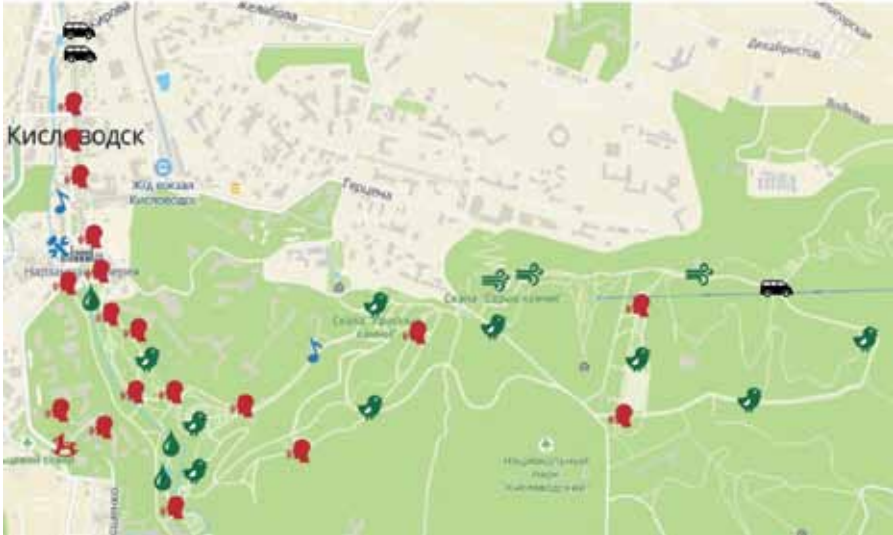
Рис. 2. Уровень шума на территории Национального парка «Кисловодский» в июне 2022 года.
Fig. 2. Noise level in the territory of the National Park “Kislovodskiy” in June 2022.

при том, что функционально они являются жилыми улицами, не предназначенными для транзита.

Жилые кварталы и рекреационные зоны центральной части Пятигорска в целом характеризуются меньшим уровнем шумового загрязнения, хотя и в этом случае нужно сделать несколько оговорок. Во-первых, некоторые рекреационные объекты центра города (проспект Кирова со скверами, Парк культуры и отдыха) не соответствуют статусу «тихих зон», который им часто придают в европейских исследованиях [6]. В них гипертрофирована развлекательная и торговая функция, из-за чего часто фиксируется высокое звуковое давление – более 60 дБ. Во-вторых, не все жилые кварталы можно признать комфортными в звуковом отношении. Территории, через которые идет городской трафик, а также попадающие в сферу активной деятельности местных жителей и туристов, характеризуются средним уровнем шума – от 50 до 59 дБ. Наконец, самыми тихими оказались внутриквартальные территории жилых зон, располагающиеся вблизи основных магистралей и маршрутов, но не затронутые интенсивной городской жизнью. В большинстве случаев они были представлены усадебной и малоэтажной застройкой.

Анализ территориальных особенностей звукового пространства в центре Пятигорска выявил важную проблему курортных городов – «зашумление» рекреационных зон, которое неблагоприятно влияет на их туристскую аттрактивность. Для того чтобы выделить и охарактеризовать звуковую среду этих рекреационных зон, был выбран самый крупный и привлекательный объект Кавказских Минеральных Вод – Кисловодский курортный парк.

По аналогии с Пятигорском, были проведены измерения уровня шума на территории Национального парка «Кисловодский» и прилегающих к нему частей города (рис. 2). В отличие от небольших зеленых рекреационных зон центральной части Пятигорска, четко прослеживается снижение уровня шума при удалении вглубь парка. Территория жилой и общественно-деловой застройки на входе в парк (Курортный бульвар и окрестности Нарзанной галереи) характеризуются максимальным уровнем шумового загрязнения (более 60 дБ), сопоставимым с автомобильными



- Трафик**
автомобили/электрокары
- Природа**
ветер/шелест листьев
пение птиц
вода
- Бизнес**
музыка/реклама
ремонт
- Человек**
речь
играющие дети

Рис. 3. Преобладающие типы звуков на территории Национального парка «Кисловодский» в июне 2022 года.
Fig. 3. Prevailing types of sounds in the territory of the National Park “Kislovodskiy” in June 2022.

магистралями центра Пятигорска. Далее уровень шума убывает – до средних значений (40-60 дБ) в нижней части парка вдоль реки Ольховка и до нормального для рекреационной зоны показателя (30-40 дБ) в верхней части. При общей закономерности уменьшения шума при удалении вглубь парка наблюдаются и некоторые аномалии. Для их объяснения и внутренней дифференциации звукового пространства парка потребовалась классификация и типология звуков (рис. 3)

При изучении зависимости уровня шума от вида преобладающего звука, выявлены определенные закономерности. Во-первых, точки с минимальным шумом характеризовались доминированием природных звуков – пением птиц, звуком ветра и воды. Они располагались преимущественно в верхней части парка (Долина роз, Серые камни и начало подъем на гору Красное Солнышко), а также в нижней части – у моста Дамский каприз и беседки Стеклянная струя.

Во-вторых, территория Курортного бульвара, самая неблагоприятная с точки зрения звукового комфорта, сформирована антропогенными звуками – различной человеческой деятельностью, транспортом, бизнес-активностью. Причем их разнообразие образует звуковой палимпсест. Высокое звуковое давление в этом районе усугубляется присутствием категорически несоответствующих рекреационной функции территории видов звука – строительного ремонта и звуковой рекламы.

Наконец, очевидное деление звукового пространства на три зоны по уровню комфорта: комфортную (верхний парк), среднекомфортную (нижний парк) и некомфортную (Курортный бульвар), имеет внутреннюю специфику, отражающую практики использования территории. Так, даже в «тихой» верхней части встречаются несоответствующие рекреационной функции звуки – громкая популярная музыка в кафе; транспорт и строительная техника в реконструируемом вблизи парка санатории им. Г.К. Орджоникидзе. В нижнем парке главным фактором формирования звукового пространства выступают большие потоки людей, в основном туристов. В высокий сезон многочисленные рекреанты заметно ухудшают состояние звуковой среды и делают территорию менее комфортной.

Ситуация в нижнем парке во многом обусловлена и устоявшимися практиками, и внутренней географией, и логистикой территории. В условиях ограниченной площади и плотности рекреационных объектов и обязательного транзита туристов в верхний парк комфорт звукового пространства нижней части парка всегда будет находиться в ситуации конфликта и напряженности.

Выводы

1. Увеличение научного интереса к звуку в городе, осознание культурно-географических различий звукового пространства от города к городу позволяет говорить о новом этапе в городских исследованиях. Звук – это не только физический фактор окружающей среды, но и опыт человеческих практик, технологии производства и воспроизводства звука, юридические регламенты использования, по-разному звучащие объекты. Звук может претендовать на роль инструмента выявления универсальных социокультурных структур и быть не только предметом научного анализа, но и источником методологических установок и концептуальных построений. Звуковые исследования могут освежить то, как мы осмысливаем выражение социальных практик и сопутствующие им социально-исторические контексты [9].
2. Курортные города Кавказских Минеральных Вод проектировались и строились практически без учета требований к качеству и комфорту звуковой среды. В результате основные характеристики их звукового пространства не отличаются от обычных «нерекреационных» городов. Главными факторами, формирующими каркас звукового пространства, выступают транспортные магистрали, человеческие потоки и бизнес-активность в городе. В рекреационных зонах звуковое давление снижается, однако имеет свою внутреннюю специфику.

3. На примере исследования звукового пространства Национального парка «Кисловодский» выявлены зоны звуковой комфортности – высокой (верхняя часть парка), средней (нижняя часть парка) и низкой (Курортный бульвар). Уровень шума зависит от видов преобладающих звуков на территории, которые, в свою очередь, отражают применяемые человеком практики их использования. В целом, даже на примере такой исключительно важной в масштабах страны рекреационной зоны как Национальный парк «Кисловодский», нельзя говорить об осознанном развитии и планировании его звукового пространства.

Благодарности

Авторы благодарят студентов-географов Северо-Кавказского федерального университета группы ГЕО-б-о-21-1 за сбор полевого материала в рамках практики по экономической и социальной географии в июне 2022 года.

Acknowledgments

The authors thank the geography students of the North Caucasus Federal University of the GEO-b-o-21-1 group for collecting field material as part of an internship in economic and social geography in June 2022.

Библиографический список

1. Возьянов А. «Коробка для звуков?» О саундскейпе городского двора. Микроурбанизм. Город в деталях. М.: Новое литературное обозрение, 2014. С. 111–131.
2. Глазычев В. Л. Город без границ. М.: Территория будущего, 2011. 400 с.
3. Замятин Д. Н. Пространство и звук: к пространственным антропологиям звука и звучания // Звук и отзвук. М.: Институт наследия, 2010. С. 131–142.
4. Логотов А. В. Звуковые практики и материальность городского пространства // Городские исследования и прак-

тики. 2018. № 2 (4). С. 39–50. <https://doi.org/10.17323/usp24201739-50>.

5. Чубукова М. А. Особенности звуковой среды Арбатского района г. Москвы // Городские исследования и практики. 2015. Пилотный номер. С. 67–79. <https://doi.org/10.17323/usp00201568-79>.
6. Aletta F., Kang J., Astolfi A., Fuda S. Differences in soundscape appreciation of walking sounds from different footpath materials in urban parks // Sustainable Cities and Society. 2016. No. 27. P. 367–376.
7. Colombijn F. Tooooo! Vrooooo! The Urban Soundscape in Indonesia // Sojourn: Journal of Social Issues in Southeast Asia. 2007. Vol. 22. No. 2. P. 255–272.
8. Feld S. Sound and Sentiment: Birds, Weeping, Poetics and Song in Kaluli Expressions. Philadelphia: University of Pennsylvania Press. 1990. 297 p.
9. Mowitt J. Sounds: The ambient humanities. Oakland: University of California Press. 2015. 184 p.
10. Sakieh Y., Jaafari S., Ahmadi M., Danekar A. Green and calm: Modeling the relationships between noise pollution propagation and spatial patterns of urban structures and green covers. Urban Forestry & Urban Greening. 2017. No. 24. P. 195–211.
11. Schafer R. M. Exploring the new soundscape. UNESCO Courier. 1976. November. P. 4–8.
12. Schafer R.M. The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World. N. Y.: Knopf. 1977. 320 p.
13. Smith C.J. The acoustic experience of place: An exploration of the soundscapes of three Vancouver area residential neighbourhoods. National Library of Canada. 1994. 499 p.
14. Sterne J. The Sound Studies Reader. N. Y.: Routledge. 2012. 576 p.

References

1. Vozyanov A. “A box for sounds?” On the soundscape of the city palace. Micro-urbanism. The city in details. M.: New Literary Review, 2014. P. 111–131. (In Russ.)
2. Glazychev V. L. City without borders. M.: Territory of the future, 2011. 400 p. (In Russ.)
3. Zamyatin D. N. Space and sound: towards spatial anthropolo-

- gies of sound and sound. Sound and echo. Moscow: Heritage Institute, 2010. P. 131–142. (In Russ.)
4. Logutov A.V. Sound practices and the materiality of urban space. Urban research and practice. 2018. No. 2(4). P. 39–50. <https://doi.org/10.17323/usp24201739-50> (In Russ.)
 5. Chubukova M. A. Features of the sound environment of the Arbatsky district of Moscow. Urban research and practice. 2015. Pilot number. P. 67–79. <https://doi.org/10.17323/usp00201568-79> (In Russ.)
 6. Aletta F., Kang J., Astolfi A., Fuda S. Differences in soundscape appreciation of walking sounds from different footpath materials in urban parks. Sustainable Cities and Society. 2016. No. 27. P. 367–376.
 7. Colombijn F. Toooot! Vroooom! The Urban Soundscape in Indonesia. Sojourn: Journal of Social Issues in Southeast Asia. 2007. Vol. 22. No. 2. P. 255–272.
 8. Feld S. Sound and Sentiment: Birds, Weeping, Poetics and Song in Kaluli Expressions. Philadelphia: University of Pennsylvania Press. 1990. 297 p.
 9. Mowitt J. Sounds: The ambient humanities. Oakland: University of California Press. 2015. 184 p.
 10. Sakieh Y., Jaafari S., Ahmadi M., Danekar A. Green and calm: Modeling the relationships between noise pollution propagation and spatial patterns of urban structures and green covers. Urban Forestry & Urban Greening. 2017. No. 24. P. 195–211.
 11. Schafer R. M. Exploring the new soundscape. UNESCO Courier. 1976. November. P. 4–8.
 12. Schafer R.M. The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World. N. Y.: Knopf. 1977. 320 p.
 13. Smith C.J. The acoustic experience of place: An exploration of the soundscapes of three Vancouver area residential neighbourhoods. National Library of Canada. 1994. 499 p.
 14. Sterne J. The Sound Studies Reader. N. Y.: Routledge. 2012. 576 p.

**Статья поступила в редакцию 14.05.2023,
статья одобрена после рецензирования 25.08.2023,
статья принята к публикации 15.09.2023.**

The article was submitted to the editorial office 14.05.2023,
the article was approved after reviewing 25.08.2023,
the article was accepted for publication 15.09.2023.

Информация об авторах

Супрунчук Илья Павлович, кандидат географических наук, доцент кафедры социально-экономической географии Института наук о Земле Северо-Кавказского федерального университета. Scopus ID: 57199507380.

E-mail: ilia_suprunchuk@mail.ru.

Чихичин Василий Васильевич, кандидат географических наук, доцент кафедры социально-экономической географии Института наук о Земле Северо-Кавказского федерального университета.

E-mail: wawachi@yandex.ru

Information about the authors

Ilya P. Suprunchuk, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Socio-Economic Geography Institute of Earth Sciences, North-Caucasus Federal University. Scopus ID: 57199507380.

E-mail: ilia_suprunchuk@mail.ru.

Vasily V. Chikhichin, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Department of Socio-Economic Geography Institute of Earth Sciences, North-Caucasus Federal University. Scopus ID: 57192369814.

E-mail: wawachi@yandex.ru

1.6.18.
УДК 551.578.42
DOI:

НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ
(ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ)
10.37493/2308-4758.2023.3.2

Афанасьев И. С., Северо-Кавказский федеральный университет,
Закинян Р. Г., г. Ставрополь, Россия;
Аджиева А. А. Высочгорный геофизический институт, г. Нальчик, Россия;
Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет
имени В.М. Кокова, г. Нальчик, Россия

ВНУТРИГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИЗЕМНОГО ВОЗДУХА И ЕЁ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ГОРОДА СТАВРОПОЛЯ

Введение. Известно, что временной ход температуры в течение года носит сезонный характер. Однако темпы роста температуры в переходные периоды разные. Это осложняет прогнозирование такого важного, в частности для сельского хозяйства, параметра, как температура воздуха приземного слоя атмосферы. Соответственно, в статье проводится анализ внутригодовой изменчивости температуры воздуха и её сопоставление с синусоидальной моделью годового хода температуры.

Материалы и методы исследований. Рассматриваются временные ряды температуры воздуха приземного слоя атмосферы для города Ставрополя и ставится задача – сравнение фактических и теоретических значений годовых амплитуд. В элементарной (синусоидальной) модели эта теоретическая величина оказывается прямо пропорциональной годовой дисперсии. Также рассмотрен временной ряд разностей температур (межмесячные изменения), так называемых дискретных производных, и проводится сравнение обычной и дискретной производной функции синуса в качестве элементарной модели годового хода температуры. Вводится новая величина – среднеквадратичное отклонение изменчивости, которое также характеризует дисперсию, но не для ряда температур, а их разностей.

Результаты исследований и их обсуждение. Отмечается, что теоретическое (т.е. справедливое для синусоидальной модели) и фактическое значение амплитуды годового хода температуры достаточно хорошо согласовываются. Однако из-за непериодических отклонений разница между этими величинами может достигать 2 °С, которая на графике внутригодовой изменчивости характеризуется асимметрич-

ностью. Кроме того, рассматривается среднесноголетний годовой ход температуры и проводится его анализ с использованием дискретных производных. Показано, что отношение амплитуды годовой температуры к амплитуде дискретной производной этой величины равно циклической частоте колебаний годового хода температуры.

Выводы.

Полученные результаты подтверждают возможность использования синусоидальной модели годового хода температуры (хотя и с некоторыми ограничениями, связанными с асимметричностью и сдвигом внутригодовых пиковых точек). Анализ годового хода температуры с помощью дискретных производных и его сопоставление с синусоидальной моделью позволил выявить особенности среднесноголетней внутригодовой изменчивости температуры приземного воздуха для г. Ставрополя за период 1944–2022 гг. (иногда наблюдается изменение темпов нагрева или охлаждения, в редких случаях – инверсия при рассмотрении временного ряда среднемесячных температур).

Ключевые слова: температура воздуха, среднемесячная температура, годовой ход температуры, амплитуда, элементарная (синусоидальная) модель, временной ряд, отклонение, дисперсия, дискретная производная, изменчивость

**Afanasyev I. S.,
Zakinyan R. G.,
Adzhieva A. A.**

North Caucasus Federal University,
Stavropol;
High-Mountain Geophysical Institute, Kabardino-Balkarian
State Agrarian University named after V.M. Kokov, Nalchik,
Russia

Intra-annual Variability of Surface Air Temperature and Its Modeling for the City of Stavropol

Introduction.

It is known that the time course of temperature during the year is seasonal. However, the rates of temperature growth in transition periods are different. This complicates the prediction of such an important parameter, in particular for agriculture, as the air temperature of the surface layer of the atmosphere. Accordingly, the article analyzes the intra-annual variability of air temperature and compares it with a sinusoidal model of the annual temperature course.

Materials and research

methods.

The time series of the air temperature of the surface layer of the atmosphere for the city of Stavropol are considered and the task is to compare the actual and theoretical values of annual amplitudes. In the elementary (sinusoidal) model, this theoretical value turns out to be directly proportional to the annual variance. The time series of temperature differences (inter-monthly changes), the so-called discrete derivatives, is also considered, and the comparison of the usual and discrete derivative of the sine function as an elementary model of the annual temperature course is carried out. A new value is introduced – the standard deviation of variability, which also characterizes the variance, yet not for a number of temperatures, but their differences.

Research results and

their discussion.

It is noted that the theoretical (i.e., valid for the sinusoidal model) and the actual value of the amplitude of the annual temperature course are quite well matched. However, due to non-periodic deviations, the difference between these values can reach 2 °C, which is characterized by asymmetry on the intra-annual variability chart. In addition, the average annual temperature course is considered and its analysis is carried out using discrete derivatives. It is shown that the ratio of the annual temperature amplitude to the amplitude of the discrete derivative of this value is equal to the cyclic frequency of fluctuations of the annual temperature course.

Conclusions.

The results obtained confirm the possibility of using a sinusoidal model of the annual temperature course (although with some limitations related to the asymmetry and shift of intra-annual peak points). The analysis of the annual temperature course using discrete derivatives and its comparison with the sinusoidal model revealed the features of the average annual intra-annual variability of surface air temperature for the city of Stavropol for the period 1944 – 2022. Sometimes there is a change in the rate of heating or cooling; in rare cases, there is an inversion when considering the time series of average monthly temperatures).

Keywords:

air temperature, average monthly temperature, annual temperature course, amplitude, elementary (sinusoidal) model, time series, deviation, variance, discrete derivative, variability

Введение

Сегодня временные ряды, позволяющие рассмотреть годовой и многолетний ход температуры приземного воздуха, достаточно хорошо изучены. Например, для определения сезонности и циклов временного ряда температур проводят спектральный и автокорреляционный анализ [3, 15, 20]. Также исследователи используют сингулярно-спектральный анализ – это позволило провести анализ и прогноз рядов летних температур юга европейской территории России (ЕТР) [14, 19]. Использование данных методов подтверждает проблему глобального потепления, на их основе также строят прогностические модели [1, 13, 16].

Однако, помимо изучения самих временных рядов, интересно проследивать их изменчивость, то есть насколько быстро (и ускоренно) температура меняется, особенно при рассмотрении смены времён года. Ранее проводились исследования по расчету и анализу температурного режима воздуха в феврале–марте и дат устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха через 0°C в сторону повышения для юга России. Средняя дата наступления весны, несмотря на значительные колебания от года к году, в каждом из рассматриваемых многолетних периодов смещалась на более ранние сроки [4]. В текущей работе будет рассмотрено, в какие месяцы температура воздуха ускоренно растёт или падает на примере изменчивости (дискретной производной), что позволит более детально, по сравнению с традиционным анализом, изучить годовой ход температуры [9, 17].

Соответственно, рассматриваются такие инструменты анализа температуры, как годовая дисперсия и межмесячная изменчивость (разница между соседними месяцами, дискретная производная ВР температур). Также проводится сопоставление годового хода температуры с элементарной синусоидальной моделью. Это позволяет изучить климатические особенности г. Ставрополя, используя новые подходы, указанные выше.

Для внутригодовой изменчивости общепринятая амплитуда равна половине разности температуры наиболее жаркого и наиболее холодного месяца. Кроме того, при аппроксимации годового ход температуры можно представить в виде синусоидального распределения. Однако в этом случае амплитуда колебаний будет иметь уже

другое значение [12]. Также при рассмотрении годового хода температуры наблюдаются непериодические отклонения, связанные с замедлением либо ускорением изменения среднесуточной температуры (например, «бабье лето»). Это отражается и на значениях среднемесячных температур, из-за чего график годового хода оказывается асимметричным. Выявление непериодических отклонений предполагает сравнение фактического и синусоидального годового хода температуры.

Задачами данной работы являются: анализ временных рядов температуры и их статистических характеристик, нахождение дискретных производных к данным величинам.

Целью данной работы является изучение особенностей годового хода температуры и его сравнение с моделью синусоидального хода температуры, используя статистические величины (отклонение, дисперсия) и рассматривая ряды разностей температур (изменчивость).

Материалы и методы исследований

При рассмотрении внутригодовой изменчивости приземной температуры воздуха для г. Ставрополя проводился статистический анализ данных среднемесячных температур за период 1944–2022 гг. В работе рассчитываются следующие величины:

- 1) *внутригодовое отклонение $\hat{T}$* — разность между среднемесячным T_{ij} и среднегодовым $\bar{T}_i$ значениями температуры, т. е. $\hat{T}_{ij} = T_{ij} - \bar{T}_i$ (*сезонная составляющая*);
- 2) *годовая амплитуда T_{0j}* ;
- 3) *среднеквадратичное отклонение (выборочная дисперсия) температуры σ_i* для i -го года (j — индекс месяца):

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum \hat{T}_{ij}^2}{12}}; \quad (1)$$

- 4) *межмесячное изменение температуры* — *разница значений температуры воздуха между соседними месяцами $\Delta T_j = T_j - T_{j-1} = \hat{T}_j - \hat{T}_{j-1}$* (прогрев или охлаждение).

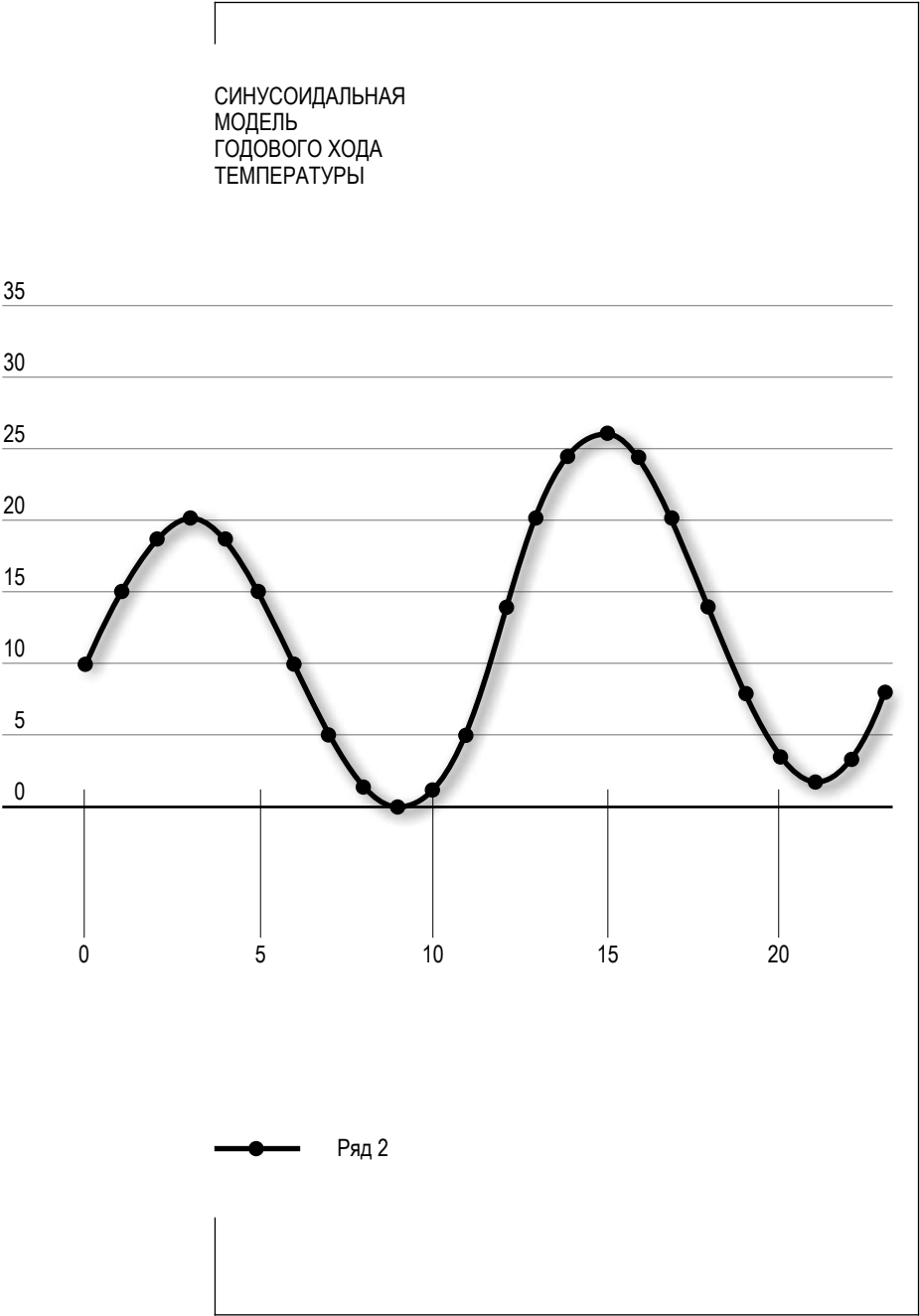


Рис. 1. Пример синусоидальной модели годового хода температуры для двух лет с разными годовыми амплитудами и среднегодовыми значениями.

Fig. 1. An example of a sinusoidal model of the annual temperature course for two years with different annual amplitudes and average annual values.

**Элементарная (синусоидальная)
модель годового хода
температуры**

На основе указанных характеристик была предложена элементарная модель годового хода температуры (внутригодовой изменчивости), согласно которой изменение внутригодового отклонения температуры воздуха по месяцам имеет преимущественно синусоидальный характер:

$$\hat{T} = T_0 \sin\left(\frac{2\pi}{12}t + \varphi_0\right), \quad (2)$$

где время t — в мес.;

T_0 — годовая амплитуда, которая причём различная для каждого года;

φ_0 — начальная фаза, когда температура равна среднегодовой;

$\omega = \frac{2\pi}{12}$ — циклическая частота годового хода температуры.

Аналогично можно записать функцию модели годового хода температуры (2) в виде: $T = \bar{T} + T_0 \sin\left(\frac{2\pi}{12}t + \varphi_0\right)$. На рисунке 1 заданы гармонические функции $T = 10 + 10\sin\left(\frac{2\pi}{12}t\right)$ для первого года и $T = 14 + 12\sin\left(\frac{2\pi}{12}t\right)$ для второго года.

Фактическое значение годовой амплитуды температуры $T_{0\text{факт}}$ равно половине разности максимальной $T_{\max}$ и минимальной $T_{\min}$ среднемесячных значений температуры за год:

$$T_{0\text{факт.}} = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}. \quad (3)$$

В случае, когда график годового хода температуры близок к синусоидальному (2), можно найти теоретическое значение амплитуды через годовую дисперсию среднемесячных температур (1). С учётом равенства $\sqrt{\sum_{n=1}^{12} \sin^2 \frac{2\pi n}{12}} = 6$ получаем соотношение:

$$T_{0\text{теор.}} = \sqrt{2}\sigma. \quad (4)$$

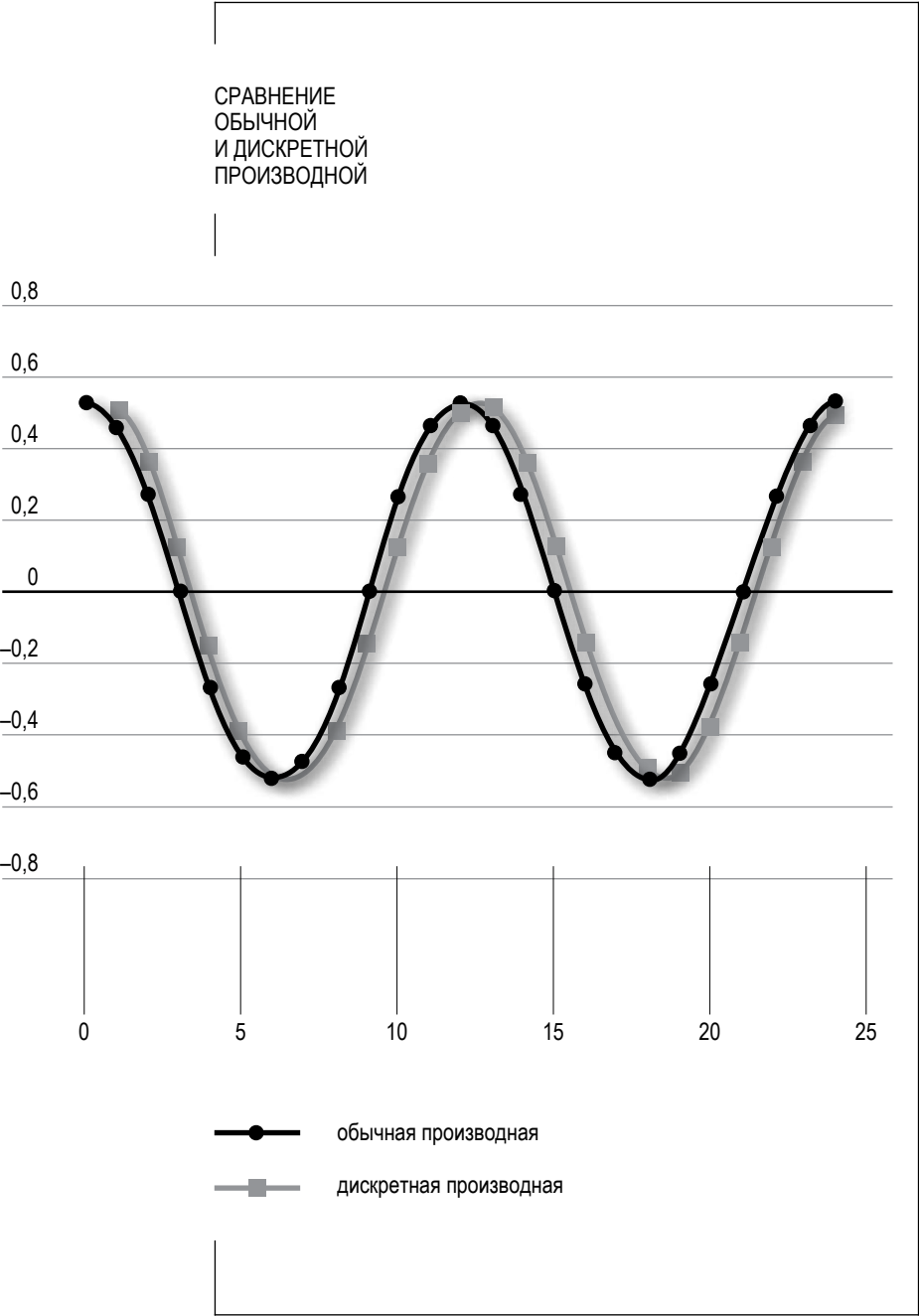


Рис. 2. Обычная и дискретная производная к синусоиде с годовым периодом (по оси *OX* — время в мес., по оси *OY* — значение амплитуды разностей температур)
Fig. 2. Ordinary and discrete derivatives of a sinusoid with an annual period (on the *OX* axis — time in months, on the *OY* axis — the value of the amplitude of the temperature differences)

*Дискретные производные и изменчивость
в синусоидальной модели годового хода
температуры*

Дискретной производной последовательности T_i называют такую последовательность ΔT_i , которая может быть представлена в виде ряда разностей соседних среднемесячных значений температур $T_2 - T_1, T_3 - T_2, \dots, T_i - T_{i-1}$. Дискретная производная первого порядка в данном примере характеризует межмесячное изменение температуры.

Рассмотрим нахождение обычной и дискретной производной функции синуса (2), которая используется в качестве модели годового хода температуры, считая, что $T_0 = 1^\circ\text{C}$ (единичная амплитуда) и $\varphi_0 = 0$. На рисунке 2 обычная производная элементарной функции годового хода температуры – $\hat{T}' = \frac{2\pi}{12} T_0 \cos\left(\frac{2\pi}{12}t + \varphi_0\right)$, дискретная – $\Delta T(t) = T(n) - T(n-1)$, здесь $\omega = \frac{2\pi}{12}$.

Можно заметить, что существенной разницы между графиками обычной и дискретной производной гармонической функции нет. Значение амплитуды межмесячной *изменчивости годового хода температуры* получилось равным $\Delta T_0 = \omega T_0$ для обеих производных. Однако иногда они либо «опаздывают», либо «спешат» относительно друг друга по времени примерно до полумесяца.

Из этого следует, что если реальный годовой ход температуры близок к гармоническому, то нахождение дискретных производных к графику этой функции оправдано. Для этого, во-первых, сравним значения теоретического (4) и фактического (3) значения амплитуд, во-вторых, соотношение амплитуды годового хода температуры и изменчивости должно быть равно ω , т. е. $\omega = \Delta T_0/T_0$, в-третьих, сдвиг фаз между графиками годового хода температуры и её изменчивости (дискретной производной) должен быть равен $\pi/2$.

В синусоидальной модели годового хода температуры теоретическое значение амплитуды связано с дисперсией (4). Аналогично (1) для годового хода межмесячной изменчивости температуры введём *среднеквадратичное отклонение изменчивости* этой величины (*коэффициент изменчивости*):

$$\sigma_{\text{изм}_i} = \sqrt{\frac{\sum \Delta \hat{T}_{ij}^2}{12}}. \quad (5)$$

Заметим, что размерности величин дисперсии и коэффициента изменчивости разные: температура воздуха T_{ij} (или её отклонение от среднегодовой $\hat{T}_{ij}$) измеряется в $^{\circ}\text{C}$, а дискретная производная температуры воздуха $\Delta\hat{T}_{ij}$ (межмесячное изменение температуры) — в $^{\circ}\text{C}/\text{мес}$.

Значения коэффициента изменчивости для обычной и дискретной производной получились практически одинаковыми. Из формул (1), (2), (4), (5) и рисунка 2 получаем соотношение:

$$\sigma_{\text{изм.}} = \omega \sigma_{\text{ср.кв.}} \quad (6)$$

Вывод:

$$\sigma_{\text{изм.}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta\hat{T}_{ij}^2}{12}} = \sqrt{\frac{(\omega T_0)^2 \sum_1^{12} \sin^2 \frac{2\pi n}{12}}{12}} = \omega \sqrt{\frac{\sum_1^{12} T_0^2 \sin^2 \frac{2\pi n}{12}}{12}} = \omega \sigma_{\text{ср.кв.}}$$

Также из (4) и (6) следует, что $\Delta T_{0\text{теор.}} = \sqrt{2} \sigma_{\text{изм.}}$ поэтому для элементарной модели годового хода температуры на рисунке 2 получили среднеквадратичное отклонение равным 0,71 ($1/\sqrt{2}$), среднеквадратичную изменчивость — 0,37 (отличие в $2\pi/12$ раз).

Таким образом, можно сравнить соотношение амплитуд графиков годового хода температуры и изменчивости также через нахождение среднеквадратичного отклонения и коэффициента изменчивости (6), а не только через разницу между максимальным и минимальным значениями среднемесячных величин (3).

При рассмотрении годового хода температуры переход на дискретную производную уместен (рис. 2), это позволяет нам рассмотреть характер изменения температуры по месяцам. Использование дискретных производных оправдывает себя только для колебательного процесса, в остальных случаях нужно избавляться от тренда (например, для полинома n -ой степени разница между обычной и дискретной производной растёт прямо пропорционально t^{n-2}).

Кроме того, в идеальной модели годового хода температуры есть ярко выраженные минимумы и максимумы, чередующиеся каждые 6 месяцев, хотя в реальности сдвиг между пиковыми значениями варьируется в пределах 5–7 мес. (наиболее морозные времена года — январь–февраль, наиболее жаркие — июль–август). Эта

особенность накладывает некоторые границы применимости модели синусоидального хода температуры.

Для более детального анализа можно найти и *вторую дискретную производную*. Её примером является $\Delta_2 T_{31} = \Delta T_{32} - \Delta T_{21}$. При нахождении дискретных производных получаем графики функций, которые в идеале должны были быть схожими с тригонометрическими. Кроме того, амплитуда должна была бы изменяться в ω раз после каждого последующего взятия производной.

Итак, на основе данных можно получить среднестатистический годовой ход температуры за последнее время, её отклонение от среднегодовых значений и производные этой величины. Кроме того, следует провести сопоставление между фактическими и теоретическими значениями температурных характеристик. Это позволит рассмотреть элементарную модель годового хода температуры и её ограничения.

Результаты исследований и их обсуждение

Быстрое преобразование Фурье в программе Statistica 12 показывает, что временной ряд среднемесячных значений температуры для произвольного 5–10-летнего диапазона имеет только единственную значимую гармонику колебаний с периодом в 12 мес., что допускает идею использования синусоидальной модели годового хода температуры приземного воздуха для рассмотрения особенностей внутригодовой изменчивости (2). В этой модели учитывается, что амплитуда температуры имела различные значения для каждого года. Соответственно, были получены как фактические (3), так и теоретические значения (4) годовой амплитуды для периода 1944–2022 гг.

Можно заметить, что теоретическое и фактическое значение амплитуды годового хода температуры достаточно хорошо согласуются (рис. 3, б), коэффициент детерминации между этими величинами $R^2 = 0,7$. Однако почти во всех случаях $T_{0\text{факт.}} \geq T_{0\text{теор.}}$, на пиковых значениях разница достигает 2 °С (рис. 3, а), в среднем же отношение между величинами составляет 1,05 (рис. 3, б).

В целом, эти особенности можно объяснить тем, что годовой ход температуры асимметричен. Разница между фактической и теоретической годовой амплитудой будет усиливаться, если в отдельные

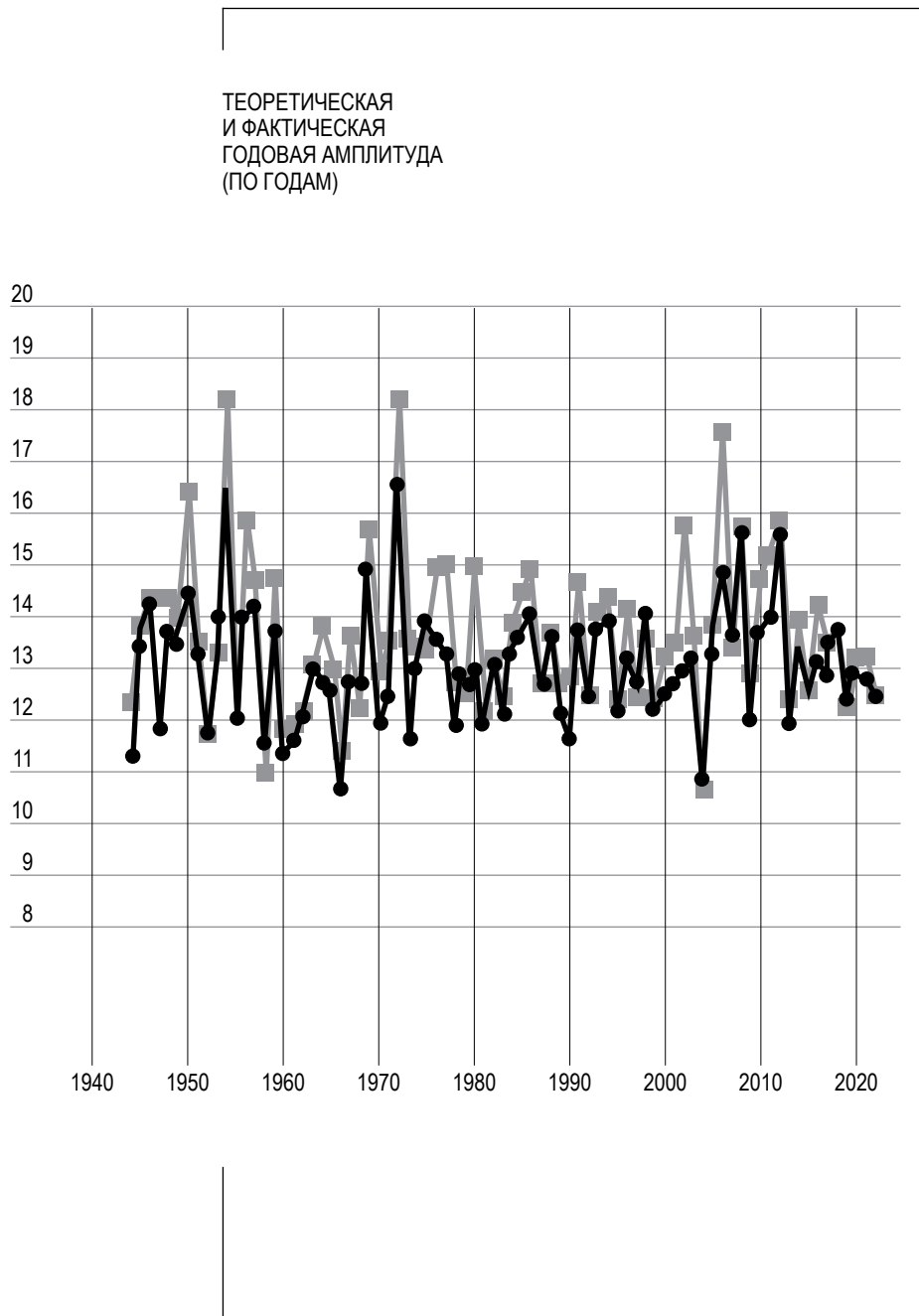


Рис. 3, а.

Изменение теоретической (квадратики) и фактической (ромбики) годовой амплитуды; по оси OX — года, по оси OY — значения величин в $^{\circ}\text{C}$.

Fig. 3, a. Change in the theoretical (squares) and actual (rhombuses) annual amplitude; on the OX axis — the year, on the OY axis — the values of the values in $^{\circ}\text{C}$.

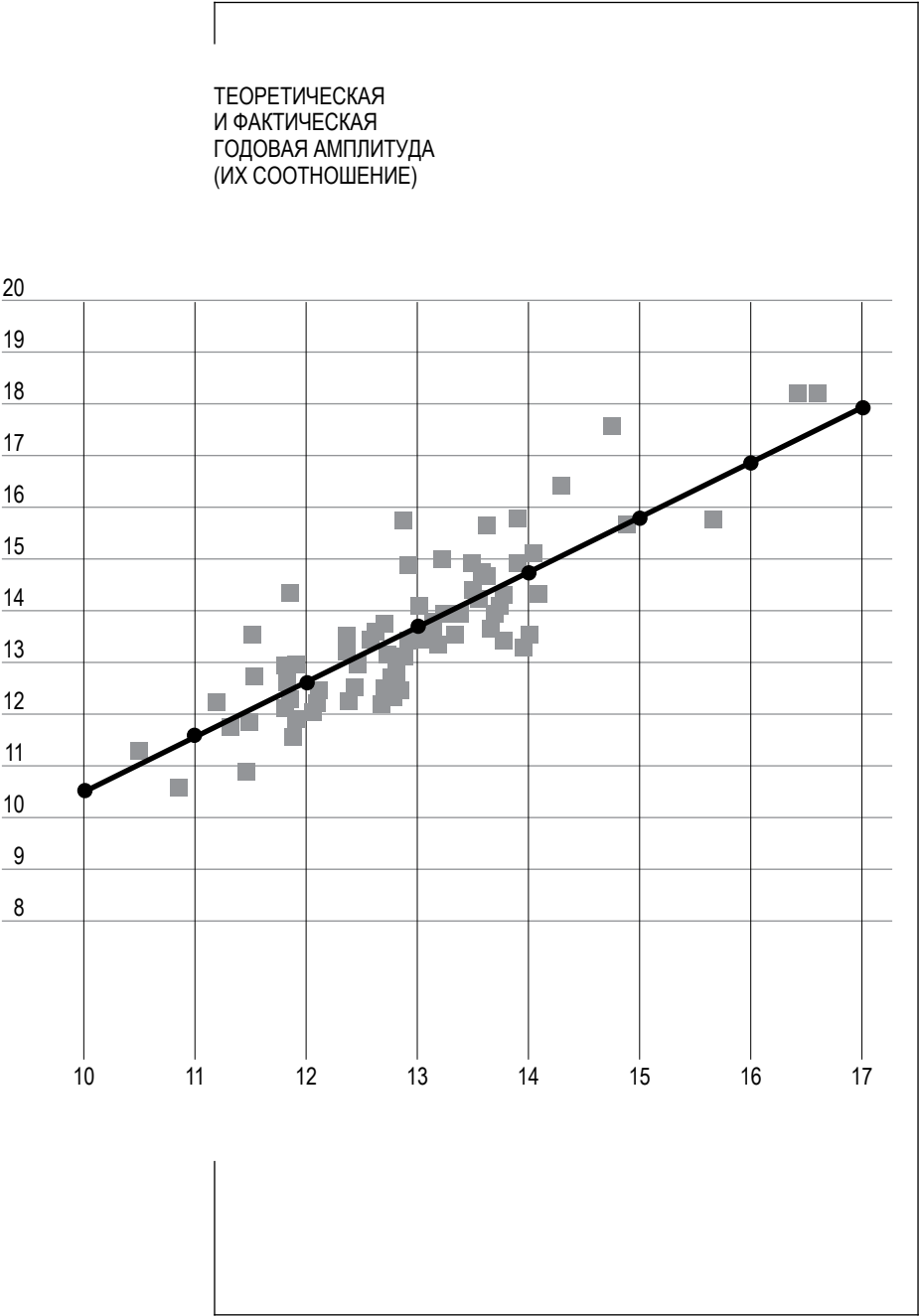


Рис. 3, б.

Соотношение теоретической (по оси OX) и фактической по оси OY) годовой амплитуды (в градусах °C).
Fig. 3, b. The ratio of the theoretical (on the OX axis) and the actual (on the OY axis) annual amplitude (in degrees °C).

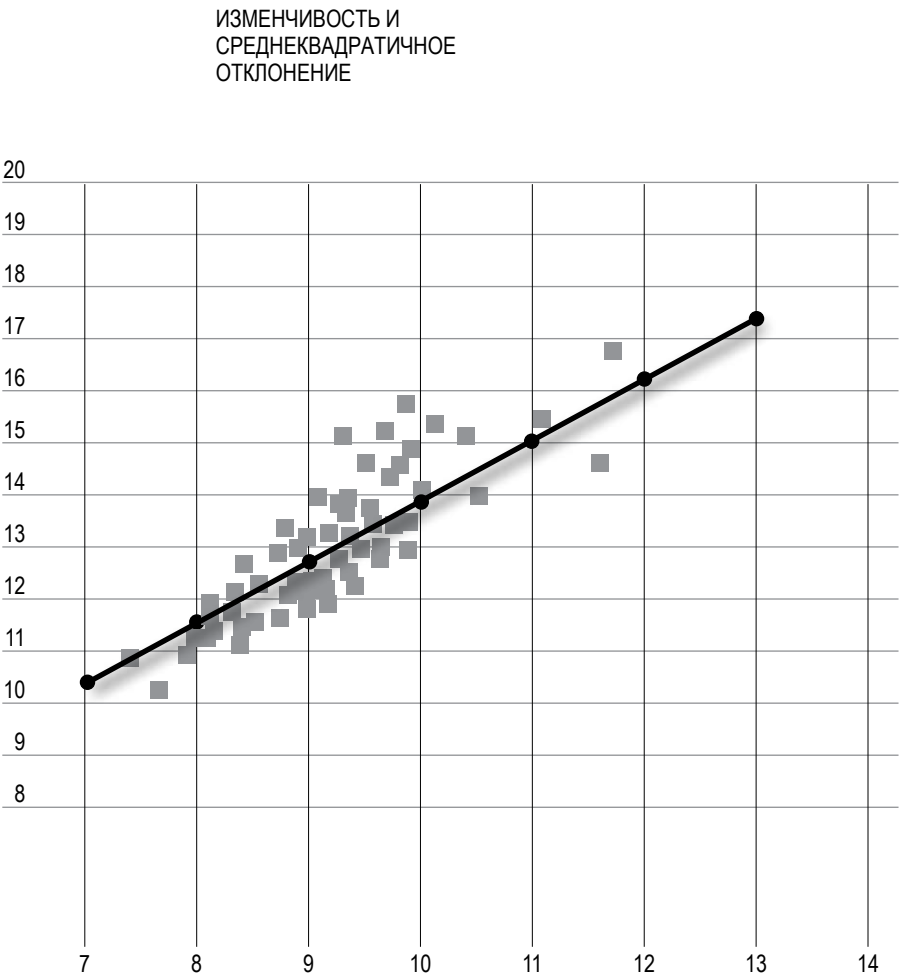


Рис. 4. Зависимость изменчивости ВР $\sigma_{\text{изм.}}$ среднемесячных значений температур от среднеквадратичного отклонения ВР $\sigma_{\text{ср.кв.}}$ (в градусах °C)
Fig. 4. Dependence of the variability of TS $\sigma_{\text{изм.}}$ of monthly mean temperatures on the standard deviation of TS $\sigma_{\text{ср.кв.}}$ (in degrees °C)

месяцы потепление или похолодание происходило более замедленно (ускоренно), либо когда наблюдалась (что было нечасто) инверсия межмесячных изменений температуры (например, декабрь более морозный, чем январь). Также стоит учитывать, что сдвиг фаз между максимумами и минимумами годовой температуры не всегда равен половине года, а варьируется в диапазоне 5–7 месяцев.

Другим признаком того, что годовой ход температуры близок к синусоидальному, является выполнение зависимости (6) между дисперсией (среднеквадратичным отклонением) и его коэффициентом изменчивости (рис. 4). Как было рассмотрено выше, должна быть справедливой прямая пропорциональность между этими величинами, на рисунке 4 видна похожая зависимость, причём коэффициент пропорциональности $0,59$ близок к $\omega = \frac{2\pi}{12} \approx 0,52$.

На основе данных среднемесячных значений температуры воздуха за период 1944–2022 гг. был получен график среднемноголетнего фактического годового хода температуры, который незначительно отличается от теоретического, т.е. синусоиды (рис. 5, а). Так, разница между месяцами с пиковыми значениями температуры воздуха (январём и июлем) – полгода, как и между месяцами, у которых температура примерно равна среднегодовой (апрель и октябрь).

Соответственно, получились следующие средние значения амплитуд: $T_{\text{факт}} = 12,95^\circ\text{C}$, $T_{\text{теор}} = 12,95^\circ\text{C}$, а зависимость (2), характеризующую годовой ход температуры, можно представить в виде (рис. 4):

$$T = -T_0 \cos \frac{2\pi t}{12} + \bar{T}, \quad (7)$$

где средняя за весь период наблюдений температура воздуха равна $\bar{T}_i = 9,58^\circ\text{C}$.

При сравнении среднемноголетнего годового хода температуры и его синусоидальной модели (рис. 5, а) можно заметить, что в отдельные месяцы наблюдается «запаздывание» фактического значения температуры от теоретического (табл. 1), хотя в целом графики примерно совпадают.

Также можно исследовать график годового хода температуры с помощью дискретных производных. На примере первой про-

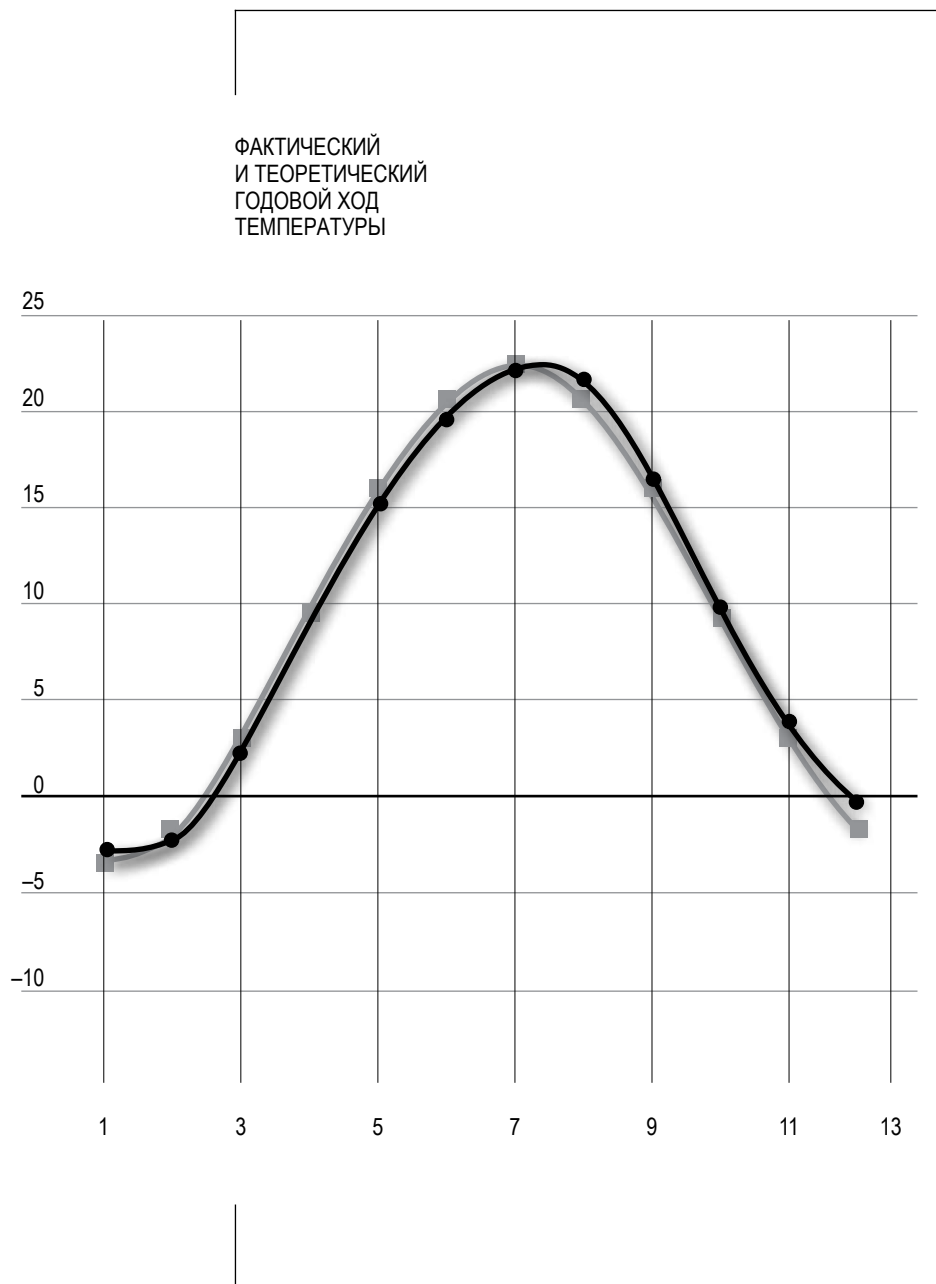


Рис. 5, а.

Среднемноголетний фактический (квадратики) и теоретический (ромбики) годовой ход температуры (в градусах °C); числа на оси ОХ соответствуют порядковым номерам месяцев.

Fig. 5, a. The average annual actual (squares) and theoretical (rhombuses) annual temperature course (in degrees °C); the numbers on the OX axis correspond to the ordinal numbers of months.

Таблица 1.

СРАВНЕНИЕ СРЕДНЕГОДОВЫХ ФАКТИЧЕСКОГО И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ГОДОВОГО ХОДА ТЕМПЕРАТУРЫ

Table 1. Comparison of the average annual actual and theoretical annual course of temperature

Месяц	Теоретическое значение температуры	Фактическое значение температуры	Разница
Январь	−3,37	−2,71	0,656329
Февраль	−1,63	−2,16	−0,52674
Март	3,11	2,04	−1,06551
Апрель	9,58	9,56	−0,02658
Май	16,06	15,25	−0,80665
Июнь	20,80	19,49	−1,30997
Июль	22,53	22,22	−0,31076
Август	20,80	21,71	0,909022
Сентябрь	16,06	16,32	0,260443
Октябрь	9,58	9,72	0,135443
Ноябрь	3,11	3,85	0,737025
Декабрь	−1,63	−0,41	1,226421

изводной (изменчивости) мы видим максимумы (июль–август) и минимумы (январь–февраль) годового хода температур по месяцам (рис. 5, б). Отметим, что амплитуда годового хода температуры $T_{\max} = 12,47\text{ }^{\circ}\text{C}$, амплитуда её дискретной производной (изменчивости) $\Delta T_{\max} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда их соотношение равно 0,56, что близко к $\frac{2\pi}{12}$.

Здесь вводится вторая производная (изменчивость изменчивости годового хода температуры). По определению, функция выпуклая вверх, когда вторая производная положительная, и вниз, когда вторая производная отрицательная. Соответственно, с 1 по 4–5 месяцы график среднегодового хода температуры выпуклый вверх, с 5 по 10 месяцы — выпуклый вниз, 11–12 месяцы — выпуклый вверх, что видно на рисунке 5, б. Иначе говоря, воздух прогревает-

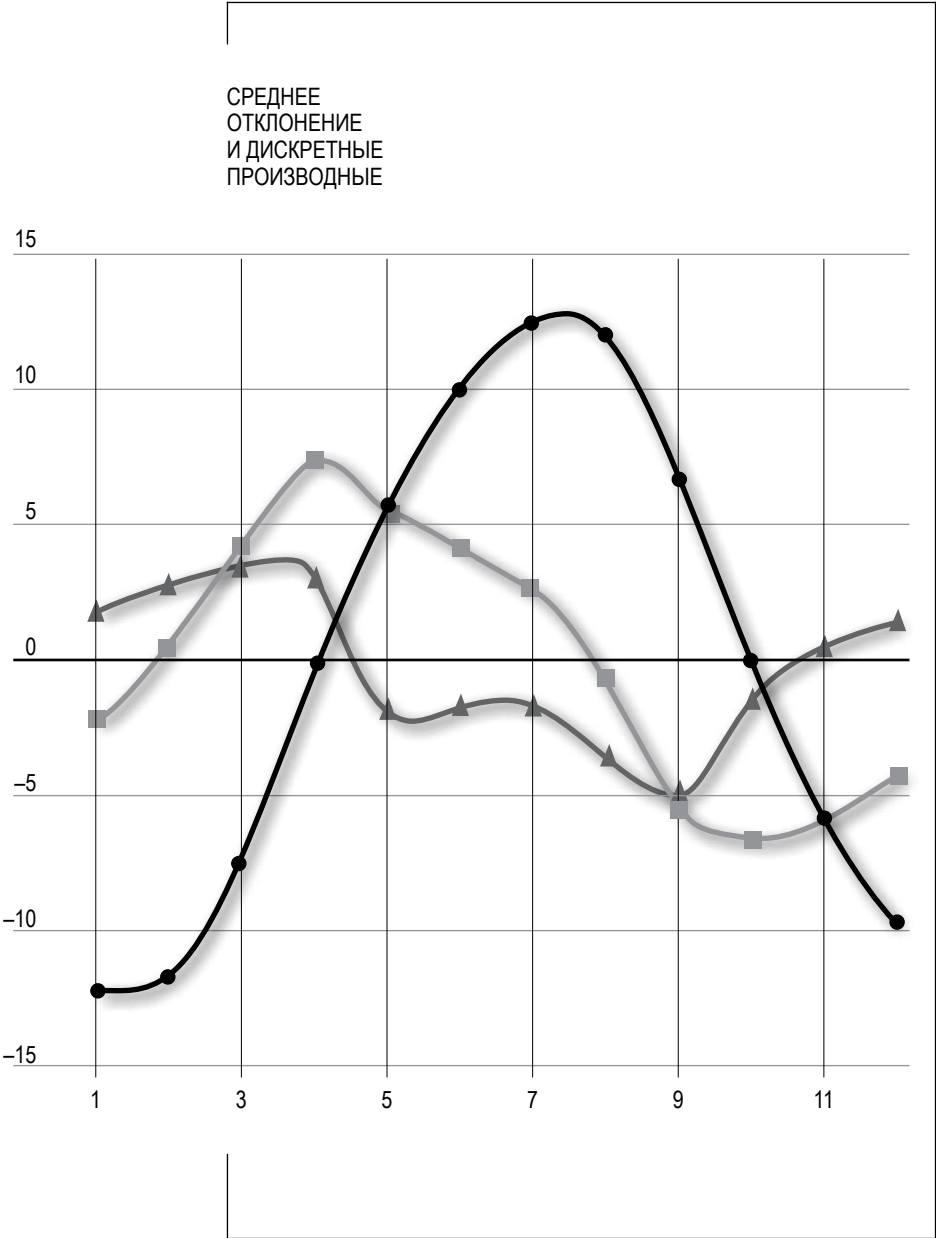


Рис. 5, б.

Средние значения по месяцам за весь период для среднего отклонения $(\overline{T_i} - \overline{T_{\text{год}}})$ — точки в виде квадратов, изменчивости $(\overline{T_i} - \overline{T_{i-1}})$ — ромбики и второй производной (изменчивость изменчивости) — стрелочки (в градусах °C).

Fig. 5, b. Monthly averages for a whole period for the mean deviation $(\overline{T_i} - \overline{T_{\text{год}}})$ are points in the form of squares, variability $(\overline{T_i} - \overline{T_{i-1}})$ is diamonds, and the second derivative (variability of variability) is arrows (in degrees °C).

ся максимально быстро в апреле, затем происходит замедление роста температуры, в июле–августе температура достигает максимума температуры и начинает ускоренно снижаться в сентябре, на начало ноября температура достигает среднегодового значения и тормозит снижение температуры, а в январе–феврале достигает минимума.

Строго говоря, графики производных всё меньше похожи на синусоидальное распределение при повышении порядка (особенно для второй производной). Это также указывает на то, что годовой ход температуры имеет всё же гораздо более сложную зависимость из-за асимметричности. Однако сравнение с элементарной (синусоидальной) моделью позволило выявить особенности изменчивости годового хода температуры по месяцам.

Выводы

При анализе внутригодовой изменчивости температуры приземного воздуха проведено сопоставление годового хода температуры с элементарной (синусоидальной) моделью. Рассчитана дисперсия для каждого года по месяцам, что позволило найти ежегодные сезонные колебания. Вводится теоретическая амплитуда годового хода температуры, которая может быть представлена в виде соотношения $T_{0\text{теор.}} = \sqrt{2}\sigma$. В работе рассмотрены также дискретные производные первого и второго порядка (ряды разностей среднемесячных температур, т.е. изменчивости, и разность разности соответственно).

Показано, что использование элементарной модели допустимо при рассмотрении годового хода температуры (на примере средних показателей за период 1944–2021 гг.), т.е., в общем, изменение температуры по месяцам имеет распределение, близкое к синусоидальному, с годовой периодичностью. На это указывает то, что соотношение амплитуд фактического годового хода температуры и её межмесячной изменчивости (дискретной производной) примерно равно $\omega \left(\frac{2\pi}{T} \right)$, где T — 12 месяцев), аналогичное соотношение (6) выполняется для среднеквадратичного отклонения $\sigma_{\text{ср.кв.}}$ и его коэффициента изменчивости $\sigma_{\text{изм.}}$.

Недостатком этой модели является то, что реальный график годового хода температуры асимметричен. Соответственно, также получен график среднемноголетней внутригодовой изменчивости температуры, который сравнивается с синусоидой. Это позволило

выявить отличительные особенности годового хода температуры, заключающиеся в том, что в отдельные месяцы потепление или похолодание происходило более замедленно (ускоренно). Кроме того, нередко разница между соседними месяцами, имеющими пиковые значения температур, достигает 5 или 7 месяцев вместо полугода, либо была заметной разность между фактической и теоретической годовой амплитудой, что усиливало асимметричность графика внутригодовой изменчивости. В исключительных случаях наблюдалась инверсия изменений межмесячных температур, т.е. декабрь был более морозный, чем январь, либо июль был прохладнее, чем июнь, что связано с особенностями атмосферных циркуляций в отдельные годы.

В целом закономерности, выявленные при рассмотрении сезонных отклонений, могут быть интересны с точки зрения климатологии. Также рассмотрен характер изменения температуры приземного воздуха по месяцам, для этого были найдены значения дискретных производных, использование которых может оказаться полезным в области метеорологии при рассмотрении внутригодового хода температуры воздуха как для г. Ставрополя, так и для других регионов.

Библиографический список

1. Афанасьев И.С., Комарова А.Р., Закинян Р.Г., Шевченко А.И. Парниковый эффект / под ред. Р. Г. Закиняна // Проблемы физики атмосферы, климатологии и мониторинга окружающей среды: доклады IV международной научной конференции (Ставрополь, 23–25 мая 2022 г.). Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2022. 256 с.
2. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Кешева Л.А., Теунова Н.В. Изменения температурного режима и режима осадков теплого и холодного периодов в различных климатических зонах Северо-Кавказского региона // Наука. Инновации. Технологии. 2021. № 3. С. 55–72.
3. Витязев В. В. Вейвлет-анализ временных рядов: учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. 58 с.
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. №1. 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. Глотова М. Ю. Математическая обработка информации: учебник и практикум для вузов / М.Ю. Глотова, Е.А. Самохвалова. 3-е изд., испр. и доп. Москва: Изд-во «Юрайт», 2023. 301 с.
7. Елисеева И.И. Статистика: учебник / И.И. Елисеева и др. Москва: Проспект, 2015. 443 с.
8. Задорожная Т. Н. Выявление циклических колебаний в полях аномалий температуры воздуха на Европейской территории / Т.Н. Задорожная, В.П. Закусилов // Science Time. 2016. № 3 (27). С. 180–186.
9. Иванова Т.В. Численные методы в оптике: учебное пособие. СПб.: Ун-т ИТМО, 2017. 84 с.
10. Кизбикенов К.О. Прогнозирование и временные ряды: учебное пособие. Барнаул: АлтГПУ, 2017. 113 с.
11. Кричевский М.Л. Временные ряды в менеджменте. Ч. 1: монография / М.Л. Кричевский. М.: Русайнс, 2016. 220 с.
12. Лапина Л.Э. Анализ изменения температуры воздуха и суммы осадков по данным метеостанций Старица и Тверь за многолетний период / Л.Э. Лапина, И.Л. Григорьева // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. 2020. № 3 (31). С. 57–78.
13. Митрова Т., Хохлов А., Мельников Ю. Глобальная климатическая угроза и экономика России: в поисках особого пути. Сколково: Центр энергетики Московской школы управления, 2020. 69 с.
14. Назаркин Н.С. Анализ временных рядов методом сингулярного спектрального анализа: магистерская диссертация: 27.04.03 / Н.С. Назаркин. Красноярск: СФУ, 2018. 51 с.
15. Отнес Р. К., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы / пер. с англ. В. И. Хохлова; под ред. И. Г. Журбенко. М.: Наука, 1982. 428 с.
16. Рогозин М. Ю. Чем опасен парниковый эффект / М.Ю. Рогозин, Д.С. Иванченко // Молодой ученый. 2017. № 51 (185). С. 120–124.
17. Самарский А. А., Гулин А. В. Численные методы: учебное пособие для вузов. М.: Наука; Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 432 с.
18. Семенов С.М. Сравнительные оценки влияния изменения концентраций диоксида углерода, метана, закиси азота и

водяного пара на радиационно-равновесную температуру земной поверхности / С. М. Семенов, И. О. Попов // Метеорология и гидрология. 2011. № 8. С. 34–33.

19. Ташилова А. А. Прогноз летних температур методом сингулярно-спектрального анализа на юге России в 2019–2023 гг. / А. А. Ташилова, Б. А. Ашабоков, Л. А. Кешева, Н. В. Теунова // Наука. Инновации. Технологии. 2020. № 2. С. 115–134.
20. Хованова Н. А., Хованов И. А. Методы анализа временных рядов / Н. А. Хованова, И. А. Хованов. Саратов: ГосУНЦ Колледж, 2001. 119 с.

References

1. Afanasiev I. S., Komarova A. R., Zakinyan R. G., Shevchenko A. I. Greenhouse effect. Problems of Atmospheric Physics, Climatology and Environmental Monitoring: Reports of the IV International Scientific Conference (Stavropol, May 23–25, 2022); ed. R. G. Zakinyan. Stavropol: Publisher NCFU, 2022. 256 p.
2. Ashabokov B. A., Fedchenko L. M., Kesheva L. A., Teunova N. V. Changes in the temperature regime and precipitation regime of the warm and cold periods in various climatic zones of the North Caucasus region. *Nauka. Innovation. Technologies*. 2021. No. 3. P. 55–72.
3. Vityazev V. V. Wavelet analysis of time series: Proc. allowance. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University, 2001. 58 p.
4. Volkova V. I., Badakhova G. Kh., Barekova M. V., Kaplan G. L. Peculiarities of the atmospheric circulation of the transitional period and fluctuations in the dates of the beginning of spring in the Central Ciscaucasia // *Nauka. Innovation. Technologies*. 2021. No. 1. P. 125–138.
5. Volkova V. I., Badakhova G. Kh., Kravchenko N. A., Kaplan G. L. Dynamics and modern temperature regime of the calendar summer on the Stavropol Upland. *The science. Innovation. Technologies*. 2020. No. 4. P. 149–160.
6. Glotova M. Yu., Samokhvalova E. A. Mathematical processing of information: textbook and workshop for universities. - 3rd ed., Rev. and additional. Moscow: Yurayt Publishing House, 2023. 301 p.
7. Eliseeva I. I. Statistics: textbook. I. I. Eliseeva and others. Moscow: Prospekt, 2015. 443 p.

8. Zadorozhnaya T. N., Zakusilov V. P. Detection of cyclic fluctuations in the fields of air temperature anomalies in the European territory. *Science Time*. 2016. No. 3 (27). P. 180–186.
9. Ivanova T.V. Numerical methods in optics. Tutorial. St. Petersburg: ITMO University, 2017. 84 p.
10. Kizbikenov K. O. Forecasting and time series: a tutorial. Barnaul: AltSPU, 2017. 113 p.
11. Krichevsky M.L. Time series in management. Part 1: monograph. M.L. Krichevsky. M.: Rusayns, 2016. 220 p.
12. Lapina L.E., Grigorieva I.L. Analysis of changes in air temperature and precipitation according to the data of the weather stations Staritsa and Tver for a long period. *Bulletin of Tver State University. Series: Geography and Geoecology*. 2020. No. 3 (31). P. 57–78.
13. Mitrova T., Khokhlov A., Melnikov Yu. Global climate threat and the Russian economy: in search of a special way. Skolkovo: Energy Center of the Moscow School of Management, 2020. P. 69.
14. Nazarkin N. S. Analysis of time series by the method of singular spectral analysis: master's thesis: 27.04.03. N.S. Nazarkin. Krasnoyarsk: SFU, 2018. 51 p.
15. Otnes R. K., Enokson L. Applied analysis of time series. Basic methods. M.: Nauka, 1982. (translated from English by V. I. Khokhlov; edited by I. G. Zhurbenko). 428 p.
16. Rogozin M. Yu. Why is the greenhouse effect dangerous / M. Yu. Rogozin, D. S. Ivanchenko. *Young scientist*. 2017. No. 51 (185). P. 120–124.
17. Samarsky A. A., Gulin A. V. Numerical methods: Textbook, manual for universities. M.: Nauka. Ch. ed. physics and mathematics lit., 1989. 432 p.
18. Semenov S. M., Popov I. O. Comparative estimates of the effect of changes in the concentrations of carbon dioxide, methane, nitrous oxide and water vapor on the radiation-equilibrium temperature of the earth's surface. S. M. Semenov, I. O. Popov. *Meteorology and Hydrology*. 2011. No. 8. P. 34–33.
19. Tashilova A.A., Ashabokov B.A., Kesheva L.A., Teunova N.V. Forecast of summer temperatures by the method of singular spectral analysis in the south of Russia in 2019-2023. *The science. Innovation. Technologies*. 2020. No. 2. P. 115–134.
20. Khovanova N. A., Khovanov I. A. Methods of analysis of time series. Saratov: GosUNTS College, 2001. 119 p.

Статья поступила в редакцию 24.04.2023,
статья одобрена после рецензирования 25.08.2023,
статья принята к публикации 10.09.2023.

The article was submitted to the editorial office 24.04.2023,
the article was approved after reviewing 25.08.2023,
the article was accepted for publication 10.09.2023.

Информация об авторах

Закинян Роберт Гургенович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и математической физики, физико-технический факультет, Северо-Кавказский федеральный университет.

E-mail: zakinyan@mail.ru

Афанасьев Игорь Сергеевич, студент направления 03.04.02 Физика, физико-технический факультет, Северо-Кавказский федеральный университет. E-mail: afanasevigor278@gmail.com.

Аджиева Аида Анатольевна, доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики, Высокогорный геофизический институт, Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова.

e-mail: aida-adzhieva@mail.ru.

Information about the authors

Robert G. Zakinyan, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Theoretical and Mathematical Physics Faculty of Physics and Technology, North-Caucasus Federal University.

E-mail: zakinyan@mail.ru.

Igor S. Afanasyev, Student, 03.04.02 Physics, Faculty of Physics and Technology, North-Caucasus Federal University.

E-mail: afanasevigor278@gmail.com.

Aida A. Adzhieva, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Higher Mathematics, High-Mountain Geophysical Institute, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.

E-mail: aida-adzhieva@mail.ru.

1.6.18.
УДК 551.578.42
DOI:

НАУКИ ОБ АТМОСФЕРЕ И КЛИМАТЕ

10.37493/2308-4758.2023.3.3

Аджиев А. Х.,
Кондратьева Н. В.,
Юрченко Н. В.,
Шидугов И. Ж.

Высокогорный геофизический институт,
г. Нальчик,
Россия

**МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА СНЕЖНОГО
ПОКРОВА В ПРИЭЛЬБРУСЬЕ**

Введение. Режим снегонакопления является важным параметром в климатических моделях, в оценке влагозапасов в почве, при расчетах уровня стока, прогноза паводков, а также для изучения загрязнения атмосферы. В связи с глобальным потеплением, наблюдаемым в последние десятилетия, происходят заметные изменения климатических характеристик, влияющих на режим снегонакопления в горах.

Материалы и методы исследований. Для анализа и оценки многолетних изменений высоты снежного покрова в работе использовались данные наблюдений за осадками и снежным покровом (с 1951 по 2022 годы) на ближайшей к курорту «Эльбрус» метеорологической станции «Терскол», расположенной на высоте 2100 м над уровнем моря. Материалами исследования являлись многолетние наблюдения за количеством осадков в холодный период года и высотой снежного покрова на метеостанции «Терскол».

С использованием методов статистического анализа по многолетним данным высоты снега за холодный период года были рассчитаны: среднее значение высоты снежного покрова и стандартное отклонение. Получены линейные тренды временного ряда, скорость изменения метеопараметра (высоты снежного покрова), выявлены аномалии относительно среднего значения за 1961 ÷ 1990 годы для каждого исследуемого ряда.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты анализа являются закономерности временного хода высоты снежного покрова на метеостанции «Терскол» с 1951 по 2022 годы. Получено, что значение средней высоты снега в полном временном ряду составило 46 см, максимальное значение составило 82 см, минимальное 16 см, среднее отклонение – 15,65 см. Временной ряд высоты снежного покрова характеризуется отрицательным трендом, выраженным линейной зависимостью. Рассчитаны значения аномалий значений высоты снега в различные годы.

Выводы. Показано, что период с 1951 по 2022 годы режим снегонакопления характеризовался ежегодным убыванием среднегодовой высоты снежного покрова на 0,1 см в год. Получены аномалии высоты снега в различные годы.

Ключевые слова: снежный покров, осадки, динамика многолетних изменений, линейный тренд, стандартное отклонение, аномалии высоты снежного покрова, плотность снега, режим снегонакопления

Adzhiev A. Kh., High-Mountain Geophysical Institute Nalchik,
Kondratieva N. V., Russian
Yurchenko N. V.,
Shidugov I. Zh.

Long-Term Dynamics of Snow Cover in the Elbrus Region

Introduction. The snow accumulation regime is an important parameter in climate models, in assessing soil moisture reserves, in calculating the level of runoff, flood forecasting, and also for studying atmospheric pollution. In connection with global warming observed in recent decades, there are noticeable changes in climatic characteristics that affect the regime of snow accumulation in the mountains.

Materials and research methods. To analyze and evaluate long-term changes in snow cover height, we used data from observations of precipitation and snow cover (from 1951 to 2022) at the Terskol meteorological station closest to the Elbrus resort, located at the altitude of 2100 m above the sea level. The materials of the study were long-term observations of the amount of precipitation in the cold season and the height of the snow cover at the Terskol meteorological station. Using the methods of statistical analysis, according to long-term data on snow depth for the cold period of the year, the mean and the standard deviation were calculated. Linear trends were obtained, the rate of change of the meteorological parameter (snow depth), anomalies were revealed relative to the average value for 1961 ÷ 1990 for each of the studied series.

Research results and their discussion. The results of the analysis are the regularities of the temporal course of snow cover height at the Terskol meteorological station from 1951 to 2022. It was found that the value of the average snow depth in the full time series was 46 cm, the maximum value was 82 cm, the minimum – 16 cm, the average deviation was 15,65 cm. The time series of snow cover height is characterized by a negative trend expressed as a linear relationship. The values of anomalies of snow height values in different years are calculated.

Conclusions. It is shown that the period from 1951 to 2022, the snow accumulation regime was characterized by an annual decrease in the average annual snow cover height by 0,1 cm per year. Snow height anomalies were obtained in different years.

Keywords: snow cover, precipitation, long-term dynamics, linear trend, standard deviation, snow depth anomalies, snow density, snow accumulation regime

Введение

Снежный покров в горах является важным ресурсом стока воды в горных реках, а также развития горнолыжных курортов. Он формирует горное оледенение, климат в предгорных районах и оказывает существенное влияние на особенности движения фронтальных процессов. В настоящее время общепризнанными являются глобальные и региональные климатические изменения. Следствием этих изменений является увеличение среднегодовых температур, которые негативно воздействуют на режим снегонакопления. Высокогорным геофизическим институтом мониторинг снежного покрова в горах Центрального Кавказа осуществляется с 50-х годов прошлого столетия. Фундаментальные работы, касающиеся снежного покрова в горах, лавин, ледников и селей, выполнены исследователями института: Сулаквелидзе Г.К., 1960; Залиханов М.Ч., 1984, 2014; Болов В.Р., 1980, 1982, 1986; Багов М.М., 2002; Докукин М.Д., 2014, 2016; Кумукова О.А., 2002 и др. [1, 3-7, 9, 11-13].

В настоящее время идет интенсивное освоение района Приэльбрусье (Кабардино-Балкарская Республика) в рекреационных целях. На южном склоне горы Эльбрус функционирует четыре канатные дороги и более десяти лыжных трасс общей протяженностью 9 км, проектируются пять новых канатных дорог и восемь горнолыжных трасс на юго-восточном склоне Эльбруса. Основным фактором для их эффективного использования является снежный покров и продолжительность его залегания. Наблюдаемые в последние десятилетия заметные изменения климатических характеристик, влияющих на режим снегонакопления в горах, являются основным препятствием рекреационного освоения Приэльбрусья. По мере увеличения среднегодовой температуры воздуха происходит уменьшение среднегодовых снегонакоплений выше нулевой изотермы в горах (3600–3700 м над уровнем моря), что также оказывает негативное воздействие на горное оледенение.

В Докладах [10, 17] об особенностях климата на территории Российской Федерации приводятся результаты исследований по данным инструментальных наблюдений (температура приземного воздуха, атмосферные осадки, высота снежного покрова, протяженность морского льда и др.) за достаточно длительный период време-

ни, которые подтверждают реальность изменения климата и режима снегонакопления (Кешева Л.А., 2011; Ашабоков Б.А., 2018; Ташилова А.А., 2013, 2021) [2, 14-16].

В данной работе проведена оценка динамики многолетних изменений высоты снежного покрова по данным метеорологической станции «Терскол», расположенной у подножия южного склона г. Эльбрус, на высоте 2100 м над уровнем моря. Для анализа были использованы данные наблюдений за осадками и снежным покровом за период с 1951 по 2022 годы.

Материалы и методы исследований

Для исследования многолетней (с 1951 по 2022 годы) динамики снежного покрова использованы характеристики снежного покрова и количество осадков в холодный период года, полученные на метеорологической станции «Терскол».

Твердые осадки в п. Терскол выпадают с ноября по апрель, что определяет возможные сроки лавинной опасности, но с высотой время, когда возможно выпадение осадков в твердом виде, увеличивается. Выше снеговой границы, которая на южном склоне г. Эльбрус проходит на высоте примерно 3 600–3 700 м, в течение всего года выпадают только твердые осадки и сход лавин возможен круглогодично. С мая по октябрь в п. Терскол осадки выпадают в виде дождя. Однако на высоте 3 000 м с конца сентября осадки, как правило, выпадают в виде снега и уже в сентябре отмечается сход первых лавин. Наибольшая повторяемость снегопадов приходится на март – до 20 дней для п. Терскол и до 23 дней для пика Терскол (высота 3 150 м над уровнем моря).

За год в п. Терскол в среднем наблюдается до 100 дней с осадками в твердом виде, а на пике Терскол – 160 дней. Максимальная средняя интенсивность снегопадов достигает 2,5 см/час, что в мировой практике считается критерием возможности образования лавин.

На территории исследования согласно собранному материалу в среднем за зиму 70 дней выпадают твердые осадки. Из них в 90% случаев имеет место слабый снегопад с интенсивностью менее 10 мм/сут. При этом с интенсивностью от 20 до 30 мм/сут в зимний период осадки выпадают 2–3 раза. Чаще они наблюдаются в ноябре. В три

года один раз наблюдаются снегопады с интенсивностью от 30 до 40 мм/сут. Как правило, такие осадки наблюдаются в январе месяце.

На южном склоне г. Эльбрус согласно многочисленным исследованиям (М.Ч. Залиханов, 2014; Н.А. Володичева, 1987 и др.) [8, 12] высота снежного покрова увеличивается с высотой над уровнем моря, достигая значений 300 см, а на подветренных склонах в Приэльбрусье до 500–600 см.

Средняя максимальная высота снежного покрова на южном склоне Эльбруса отмечается с 10 по 20 марта в диапазоне высот 2350–2750 м, с 20 марта по 5 апреля на уровне 2750–3150 м, с 5 по 20 апреля на уровне 3150–3550 м, и примерно к началу мая в диапазоне высот 3550–3950 м. При этом продолжительность устойчивого снежного покрова на высотах выше 2000 м над уровнем моря составляет 6–8 месяцев в году. На высотах 2800–3000 м продолжительность устойчивого залегания снежного покрова доходит до 10 месяцев в году.

С использованием методов статистического анализа по многолетним данным высоты снега за холодный период года рассчитаны среднее значение высоты снежного покрова и его стандартное отклонение. Получены линейные тренды временного ряда высоты снежного покрова, выявлены ее аномалии относительно среднего значения за период с 1961 по 1990 годы для каждого исследуемого ряда.

Результаты исследований и их обсуждение

Ввиду отсутствия фактических данных высоты снега с 1951 по 1980 годы, за основу были взяты данные о количестве осадков за холодный период года (с 1951 по 1980 годы) по метеостанции «Терскол», которые в дальнейшем были переведены в высоту снега (табл. 1).

Перевод количества осадков в высоту снежного покрова произведен по формуле:

$$H = \frac{\rho_{\text{в}} W}{\rho 10}, \quad (1)$$

где H – высота снежного покрова, см;
 W – количество осадков, мм;
 ρ – плотность снега, г/см³;
 $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды, г/см³.

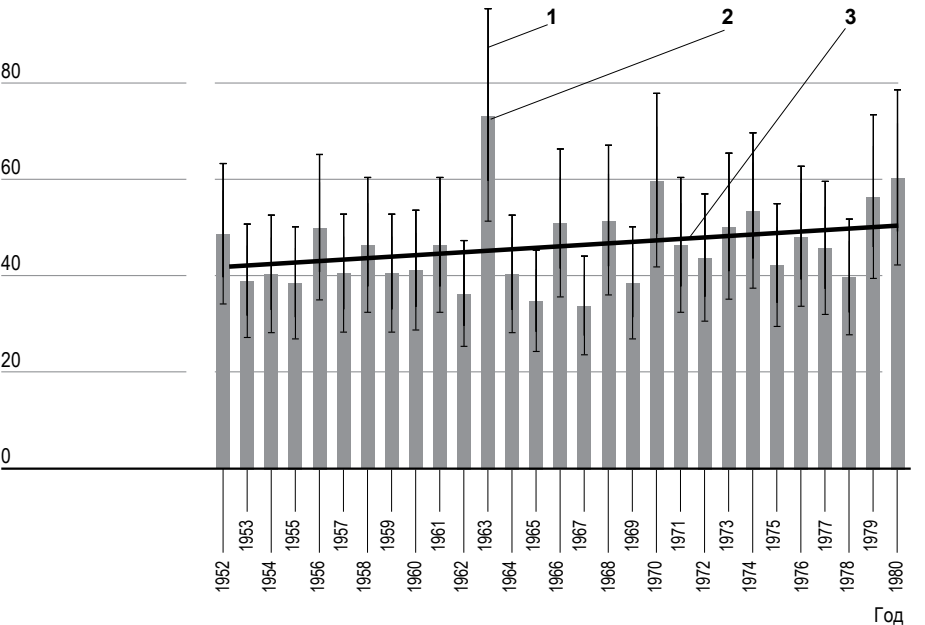
Таблица 1. КОЛИЧЕСТВО ОСАДКОВ И РАСЧЕТНАЯ ВЫСОТА СНЕЖНОГО ПОКРОВА (H) ЗА ПЕРИОД С 1952 ПО 1980 ГОДЫ ПО ДАННЫМ МЕТЕОСТАНЦИИ «ТЕРСКОЛ»
Table 1. Precipitation and estimated snow depth (H) for the period from 1952 to 1980 according to the Terskol meteorological station

Параметр	Годы													
	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965
W, мм	68	55	57	54	70	57	65	57	58	65	51	103	56	49
H, см	48,8	39,1	40,4	38,6	50,2	40,5	46,5	40,7	41,2	46,5	36,4	73,4	40,3	34,8

Продолжение таблицы 1. Table 1 continued

Параметр	Годы													
	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
W, мм	71	48	72	54	84	65	61	70	75	59	67	64	56	79
H, см	50,9	34,0	51,5	38,5	59,8	46,3	43,3	50,3	53,4	42,3	48,0	45,8	39,9	56,3

Высота снега, см



Обозначение: 1 – разброс данных; 2 – высота снежного покрова; 3 – линейный тренд.
Designation: 1 – data scatter; 2 – snow cover height; 3 – linear trend.

Рис. 1. Расчетная среднемесячная высота снега по значениям количества осадков за период с 1952 по 1980 год.
Fig. 1. Estimated snow height based on precipitation values from 1952 to 1980.

В тихую погоду свежеснег выпавший сухой снег имеет плотность около $0,1 \text{ г/см}^3$, что в пересчете по формуле (1) на 1 мм осадков составляет 1 см толщины снега.

Плотность влажного снега около $0,2 \div 0,3 \text{ г/см}^3$, что в пересчете на 1 мм осадков высота снега составляет $0,5 \div 0,3 \text{ см}$.

При перерасчете количества осадков в высоту снежного покрова было взято усреднённое значение плотности снега, равное $0,14 \text{ г/см}^3$.

Для анализа высоты снега с 1980 по 2022 годы использовались данные по метеостанции «Терскол» (ФГБУ «Северо-Кавказская ВС») (табл. 2).

Исходя из рассчитанных величин, построены диаграммы двух вышеописанных временных участков. Диаграмма первого временного участка представлена на рисунке 1. Она составлена с учетом погрешности около 30 % при расчете высоты снежного покрова.

Определив, что холодный период 1951–1952 гг. охватывает с октября 1951 года по май 1952 года, в дальнейшем для удобства период 1951/1952 гг. записан как 1952 год.

Значение средней высоты снега в представленном временном ряду составляет 46 см, максимальное значение составляет 73 см, минимальное 34 см. Стандартное отклонение расчетной высоты снега вычислялось по следующей формуле:

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum (H - \bar{H})^2}{(n - 1)}}, \quad (2)$$

где $\bar{H}$ – выборочное среднее, а
 n – размер выборки.

Исходя из этой формулы, среднее отклонение имеет значение 8,74 см.

Линейный тренд рассчитывался по формуле:

$$H = at + b \quad (3)$$

Расчеты показали, что тренд изменения среднесезонной высоты снежного покрова – положительный с коэффициентом $0,29 \text{ см} \cdot \text{год}^{-1}$.

Таблица 2.

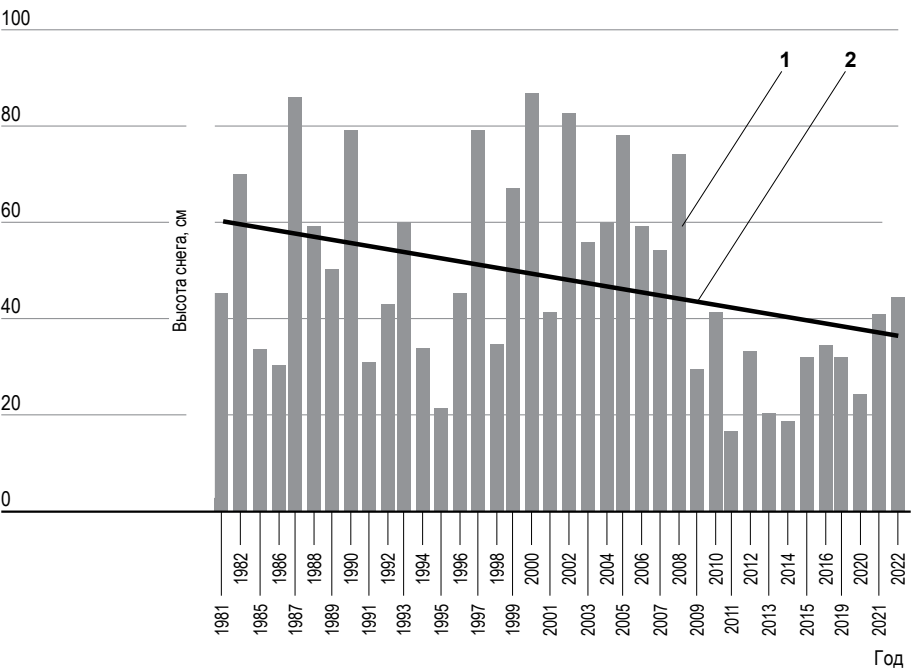
РЕЖИМ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ С 1981 ПО 2022 ГОДЫ ПО ДАННЫМ
МЕТЕОСТАНЦИИ «ТЕРСКОЛ»

Table 1. Snow accumulation regime from 1981 to 2022 according to the
Terskol weather station

Высота снежного покрова	Годы																		
	1981	1982	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Н, см	43,2	66,3	32,0	28,8	81,3	56,1	47,6	75,2	29,5	40,9	56,7	32,3	20,0	43,5	75,0	32,5	63,8	82,0	39,3

Продолжение таблицы 2. Continuation of table 2

Высота снежного покрова	Годы																		
	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2019	2020	2021	2022
Н, см	78,0	53,2	57,2	73,7	56,1	51,0	70,0	28,0	39,4	15,7	31,3	19,2	17,3	30,5	32,7	30,5	23,2	38,8	42,2



Обозначение: 1 – высота снежного покрова; 2 – тренд временного хода высоты снежного покрова. Designation: 1 – snow cover height; 2 – trend of the temporal course of snow cover height.

Рис. 2.

Высота снега по данным метеостанции «Терскол» за период с 1981 по 2022 годы.

Fig. 2. Snow height according to the Terskol weather station for the period from 1981 to 2022.

Выражение для временного хода высоты снежного покрова имеет вид:

$$H = 0,29t + 41,71 \quad (4)$$

где t – номер года с 1952 по 1980 г.

Как видно из рисунка 1, в период с 1952 года имел место ежегодный рост среднегодовых значений высоты снежного покрова. Этот факт также подтверждают результаты, представленные в работе [2]. В частности, в указанной работе отмечается, что в годы 1953, 1954, 1956, 1957, 1971, 1972 на Восточном Кавказе наблюдалось обильное выпадение снега.

Режим снегонакопления с 1981 по 2022 годы представлен в таблице 2.

Ввиду имеющихся данных с метеостанции «Терскол» о высоте снега за период с 1981 по 2022 годы, перевод количества осадков в высоту снега не потребовался.

Используя данные, представленные в таблице 2, построена диаграмма временного хода высоты снежного покрова за период с 1981 по 2022 годы (рис. 2).

Выполненный анализ показал, что данный период характеризуется уменьшением высоты снежного покрова. При этом коэффициент ежегодного уменьшения высоты снежного покрова составляет $-0,59 \text{ см} \cdot \text{год}^{-1}$. За данный период уравнение тренда имеет вид:

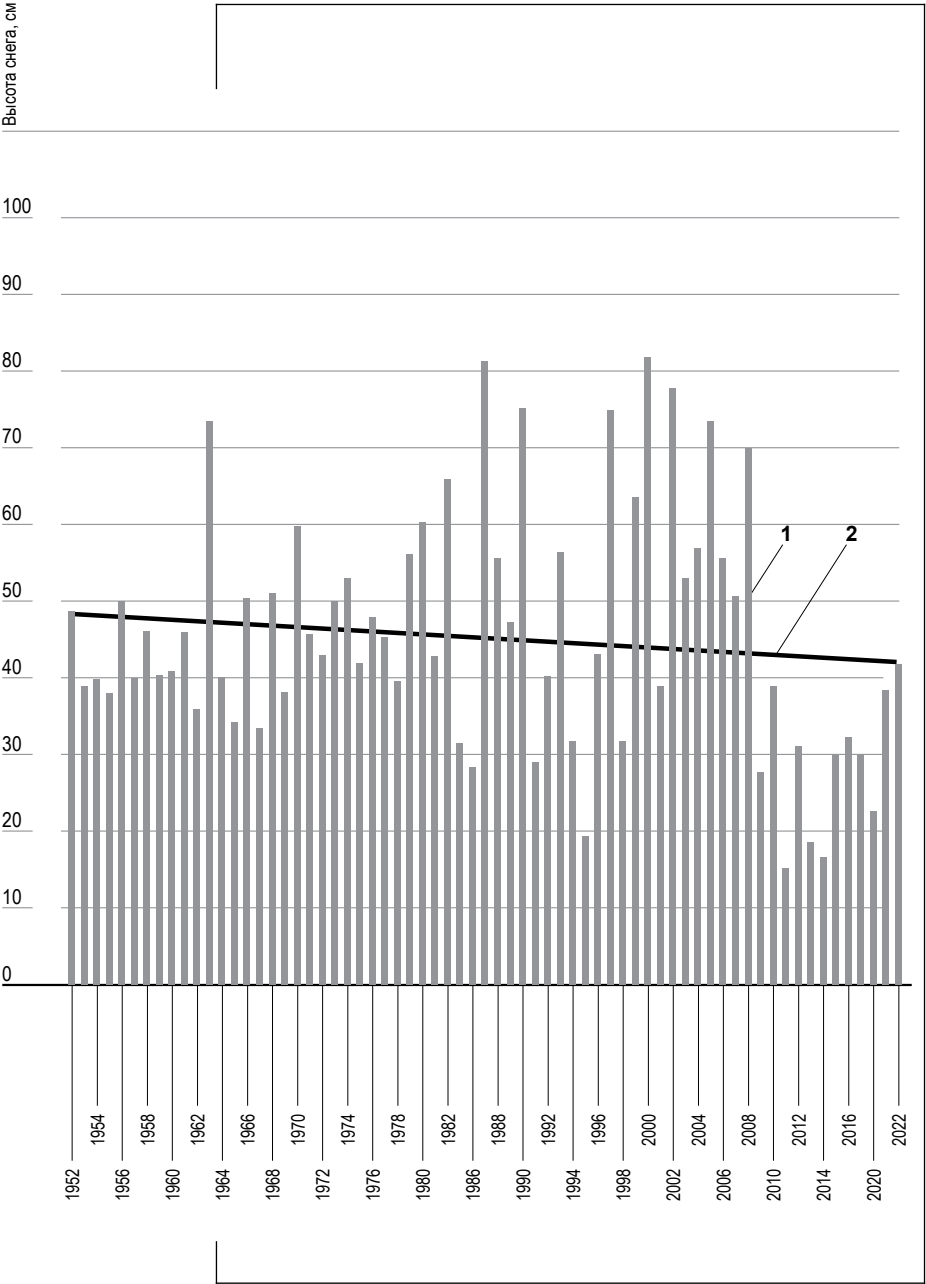
$$H = -0,59t + 57,17 \quad (5)$$

где t – номер года с 1981 по 2022 г.

Значение средней высоты снега в представленном временном ряду составляет 46 см, максимальное значение составляет 82 см, минимальное 16 см.

Стандартное отклонение высоты снежного покрова от среднего значения за этот период составило 19,47 см.

Для анализа полного временного ряда изменения высоты снежного покрова, начиная с 1952 по 2022 годы, данные были объединены в одну диаграмму, представленную на рисунке 3.



Обозначение: 1 – высота снежного покрова; 2 – тренд временного хода высоты снежного покрова. Designation: 1 – snow cover height; 2 – trend of the temporal course of snow cover height.

Рис. 3. Высота снега в полном временном ряду с 1952 по 2022 годы с отраженным линейным трендом.
Fig. 3. Snow depth in the full time series from 1952 to 2022 with a reflected linear trend.

При объединении данных значение средней высоты снега в полном временном ряду составило 46 см, максимальное значение составило 82 см, минимальное 16 см, среднее отклонение составило 15,65 см.

Как видно из рисунка 3, в целом, временной ряд высоты снежного покрова характеризуется отрицательным трендом, выраженной зависимостью:

$$H = -0,095t + 49,09 \quad (6)$$

где t – номер года с 1952 по 2022 г.

На рисунке 4 представлена сумма месячного количества осадков в различные месяцы за период наблюдения с 1952 по 2022 годы. Из данного рисунка видно, что наибольшее количество снега в холодный период года выпадает в феврале и марте.

Климатическая норма высоты снежного покрова, рассчитанная за период с 1961 по 1990 годы по данным метеостанции «Терскол», составила 49 см. Относительно определенного значения была сформирована диаграмма аномалий снежности (рисунок 5).

Как видно из рисунка 5, в целом, временной ряд снежности характеризуется отрицательным трендом, выраженным зависимостью:

$$H = -0,095t + 0,093 \quad (7)$$

Выводы

Определена межгодовая изменчивость среднегодовой высоты снежного покрова на южном склоне г. Эльбрус, которая характеризуется отрицательным значением тренда. Климатическая норма высоты снежного покрова, рассчитанная за период с 1961 по 1990 годы по данным метеостанции «Терскол», составила 49 см.

Относительно полученного значения сформирована диаграмма аномалий снежности, которая имеет отрицательный тренд с годовым коэффициентом $0,095 \text{ см} \cdot \text{год}^{-1}$.

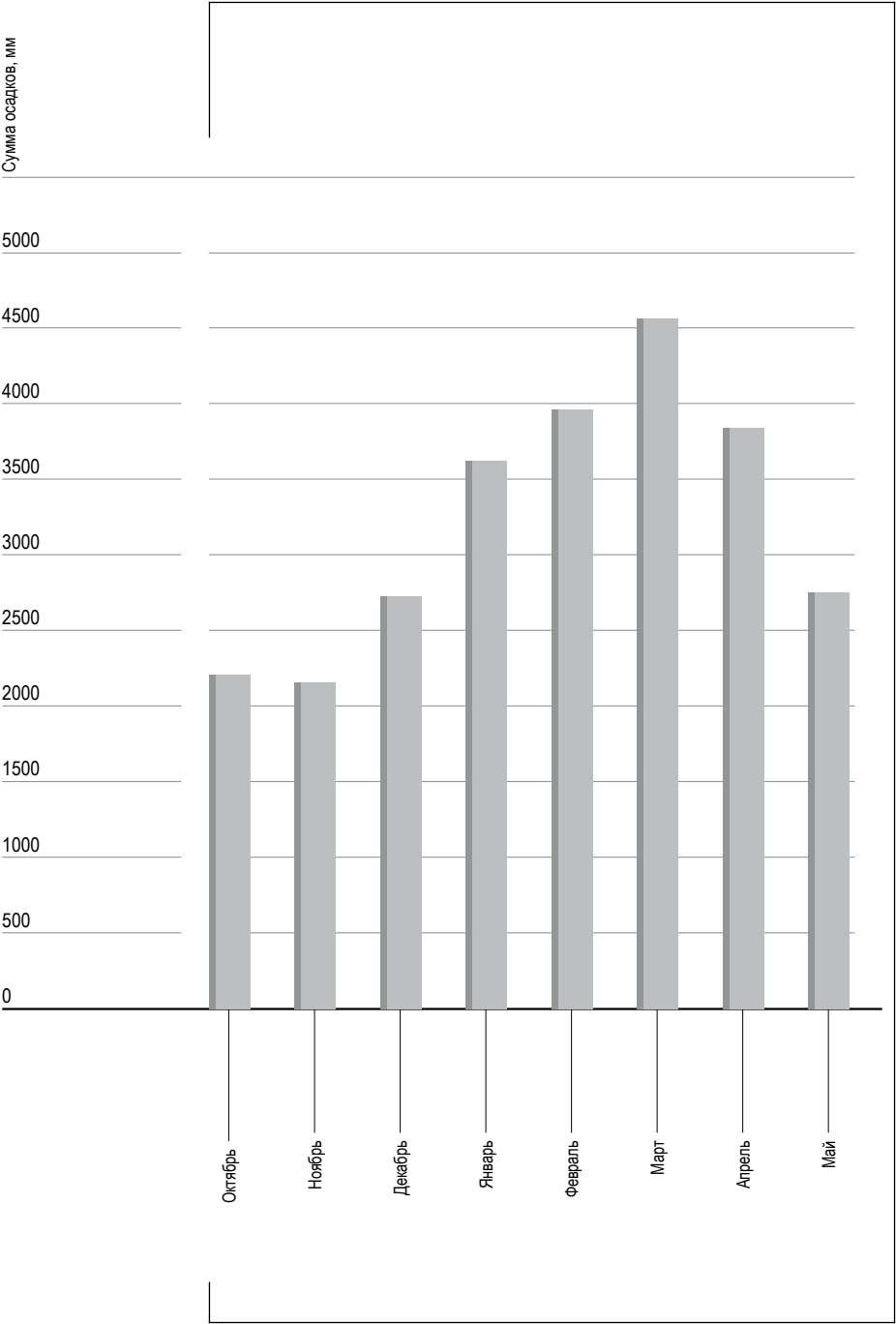
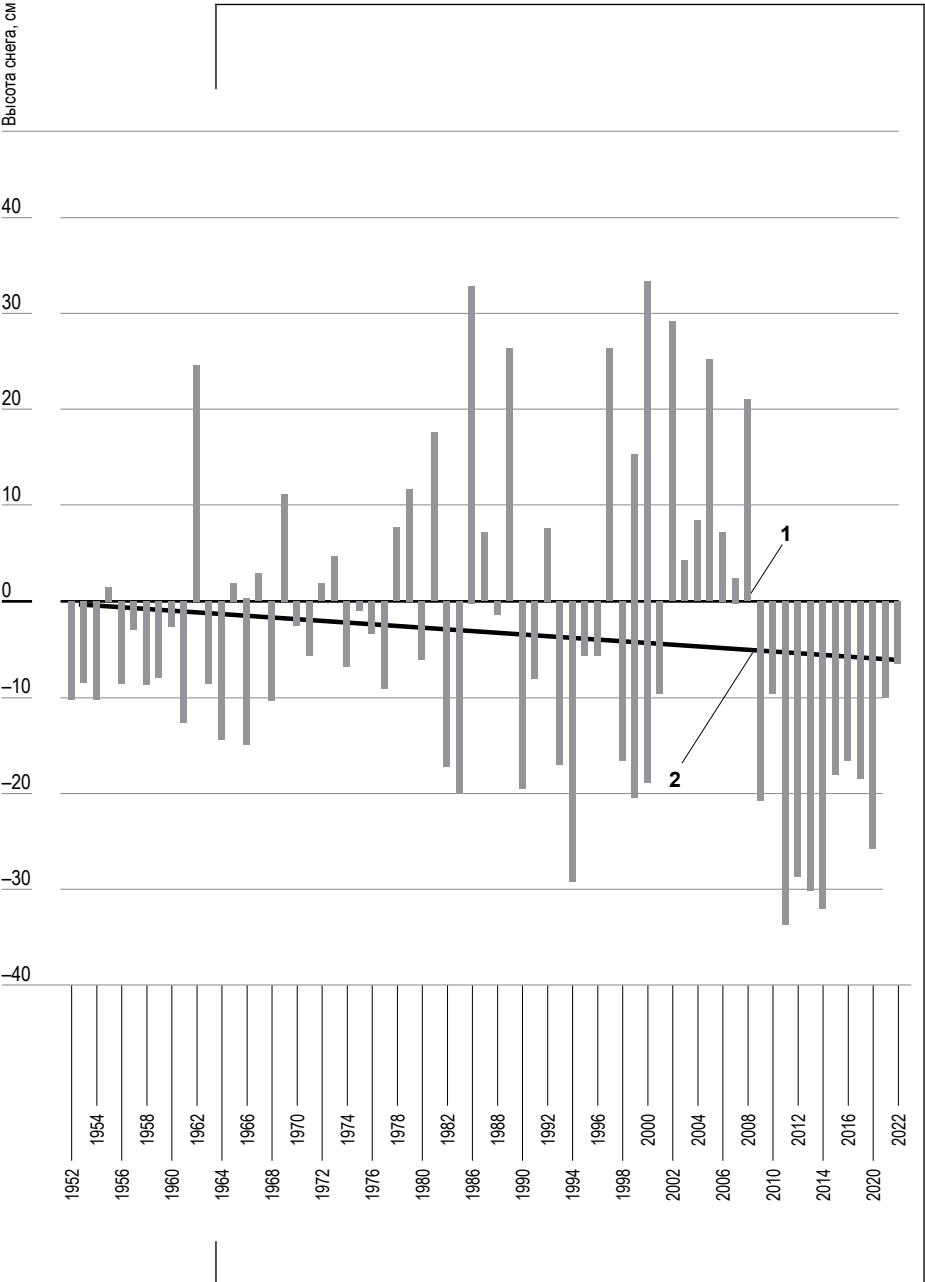


Рис. 4. Сумма месячного количества осадков в различные месяцы за период наблюдения с 1952 по 2022 годы.
Fig. 4. Sum of monthly precipitation in various months over the observation period from 1952 to 2022.



Обозначение: 1 – аномалии снежности, относительно климатической нормы; 2 – тренд временного хода высоты аномалий снежности. Designation: 1 – anomalies of snowiness, relative to the climatic norm; 2 – trend of the temporal course of the height of snow anomalies

Рис. 5. Аномалии высоты снега с 1952 по 2022 годы с отраженным линейным трендом.
Fig. 5. Snow height anomalies from 1952 to 2022 with a reflected linear trend.

Выявлено, что в период с 1952 по 2022 годы среднегодовая высота снежного покрова убывала на 0,1 см в год. Получено выражение для временного хода высоты снежного покрова. При этом наибольшее количество снега – до 82 см – за холодный период года выпадает в феврале и марте месяцах.

Библиографический список

1. Аджиев А.Х., Багов М.М., Докукин М.Д., Маркина Е.И., Теуважуков З.Н., Хаткутов А.В. Отчет по НИР на тему: «Физическое моделирование снежных лавин различных генетических типов и процессов их взаимодействия с препятствиями» // Высокогорный геофизический институт. 1 января 2014 г. 37 с.
2. Ашабоков Б.А., Крученицкий Г.М., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Шокуев Р.А. Моделирование сезонной и долговременной изменчивости снежного покрова южного федерального округа России // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. СПб., 2018. Вып. 662. С. 22–25.
3. Багов Аз.М., Докукин М.Д., Савернюк Е.А. Особенности деградации ледников Бирджалы-чиран и Чунгурчатчиран северо-восточного подножия Эльбруса и эволюция приледниковых озер за 50 лет // Гляциология в начале XXI века: материалы международной конференции. М.: Университетская книга, 2009. С. 156–161.
4. Багов М.М., Кумукова О.А., Хаджиев М.М. Научно-методическое руководство работами на снеголавинных станциях, наблюдениями за снежным покровом в горах / ГР. 01200304098 (заключительный отчет). Высокогорный геофизический институт. Нальчик, 2002. 11 с.
5. Болов В.Р. Специализированный прогноз лавинной опасности и возможности регулирования снеголавинных явлений // МГИ. 1986. Вып. 56. С. 171–176.
6. Болов В.Р. Структура снега и ее связь с лавинообразованием // МГИ. 1982. Вып. 43. С. 49–55.
7. Болов В.Р., Залиханов М.Ч., Шабельников В.А. О горизонтах разрыхления в толще снежного покрова и их значение в лавинообразовании // ВГИ, 1980. Вып. 46. С. 21–28.
8. Володичева Н.А., Олейников А.Д. Зимы повышенной снежности и лавинной опасности на Большом Кавказе // Снежный покров в горах и лавины. Москва: Академиздатцентр «Наука», 1987. С. 118–125.

9. Гуртовая Е.Е., Сулаквелидзе Г.К., Яшина А.В. Закономерности распределения снежного покрова на Большом Кавказе // География снежного покрова. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 7–19.
10. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. Москва, 2023. 104 с.
11. Докукин М.Д., Калов Х.М., Савернюк Е.А. Аэрокосмический мониторинг разрушительных склоновых и русловых процессов в ледниковой зоне Северного Кавказа // Материалы Международной научно-практической конференции «Влияние изменения климата на состояние ледников и водные ресурсы», приуроченной к проведению 26 сессии Межгосударственного совета по гидрометеорологии стран СНГ, 10–13 сентября 2014 г. Бишкек: КРСУ, 2014. С. 49–51.
12. Залиханов М.Ч. Снежно-лавиновый режим и перспективы освоения гор Большого Кавказа / Официальная и деловая Россия. М. 2014. 612 с.
13. Залиханов М.Ч., Коломыц Э.Г., Панов В.Д., Докукин М.Д. Прогноз изменения климата высокогорных ландшафтов и оледенения Большого Кавказа на ближайшие десятилетия // МГИ., 1984. Вып. 51. С. 152–159.
14. Кешева Л.А., Галаева А.А., Стасенко Д.В. Анализ изменения режима осадков в различных климатических зонах центральной части Северного Кавказа // Актуальные проблемы гидрометеорологии и экологии: Международная научно-техническая конференция, посвященная 90-летию со дня рождения академика Г.Г. Сванидзе (Грузия, 27–29 сентября 2011). Тбилиси, 2011. С. 76–79.
15. Ташилова А.А. Анализ изменений климата в Терсколе за последние 60 лет // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (Нальчик, 8-10 сентября 2021). Нальчик: Изд-во «Принт Центр». С. 468–474.
16. Ташилова А.А., Кешева Л.А., Балкарова С.Б., Шогенова М.М., Пшихачева И.Н., Таубекова З.А. Структурный анализ и прогноз зимних осадков методом «Caterpillar»-SSA // Доклады АМАН. 2013. Т. 15. № 1. С. 103–106.
17. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научно-технологии, 2022. 124 с.

References

1. Adzhiev A.Kh., Bagov M.M., Dokukin M.D., Markina E.I., Teuvazhukov Z.N., Khatkutov A.V. Research report on the topic: «Physical modeling of snow avalanches of various genetic types and the processes of their interaction with obstacles». Federal State Budgetary Institution "High Mountain Geophysical Institute" January 1, 2014. 37 p. (In Russ.).
2. Ashabokov B.A., Kruchenitsky G.M., Tashilova A.A., Kesheva L.A., Shokuev R.A. Modeling of seasonal and long-term variability of the snow cover of the southern federal district of Russia. Proceedings of the VKA im. A.F. Mozhaisky. SPb., 2018. Issue. 662. P. 22–25. (In Russ.).
3. Bagov Az.M., Dokukin M.D., Savenyuk E.A. Degradation features of the Birdzhaly-chiran and Chungurchatchiran glaciers of the northeastern foot of Elbrus and the evolution of glacial lakes over 50 years. Glaciology at the beginning of the XXI century: materials of the international conference. M.: Universitetskaya kniga, 2009. P. 156–161. (In Russ.).
4. Bagov M.M., Kumukova O.A., Khadzhiev M.M. Scientific and methodological management of work at snow avalanche stations, observations of snow cover in the mountains. GR. 01200304098 (final report). Alpine Geophysical Institute. Nalchik, 2002. 11 p. (In Russ.).
5. Bolov V.R. Specialized forecast of avalanche danger and the possibility of regulating snow avalanches. MGI. 1986. Issue. 56. P. 171–176. (In Russ.).
6. Bolov V.R. The structure of snow and its connection with avalanche formation. MGI. 1982. Issue. 43. P. 49–55. (In Russ.).
7. Bolov V.R., Zalikhanov M.Ch. and Shabel'nikov V.A. On loosening horizons in the thickness of the snow cover and their significance in avalanche formation. VGI, 1980, Issue. 46. P. 21–28. (In Russ.).
8. Volodicheva N.A., Oleinikov A.D. Winters of increased snowiness and avalanche danger in the Greater Caucasus // Snow cover in the mountains and avalanches. Moscow: Akademizdatstentr «Nauka», 1987. P. 118–125. (In Russ.).
9. Gurtovaya E.E., Sulakvelidze G.K., Yashina A.V. Patterns of distribution of snow cover in the Greater Caucasus. Geography of snow cover. M.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1960. P. 7–19. (In Russ.).
10. Report on climate features in the territory of the Russian Federation for 2022. Moscow, 2023. 104 p. (In Russ.).

11. Dokukin M.D., Kalov Kh.M., Savenyuk E.A. Aerospace monitoring of destructive slope and channel processes in the glacial zone of the North Caucasus. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference «The Impact of Climate Change on the State of Glaciers and Water Resources», timed to coincide with the 26th session of the Interstate Council for Hydrometeorology of the CIS countries, 10–13 September, 2014. Bishkek: KRSU, 2014. P. 49–51. (In Russ.).
12. Zalikhanov M.Ch. Snow-avalanche regime and prospects for the development of the mountains of the Greater Caucasus. Official and Business Russia. M., 2014. 612 p. (In Russ.).
13. Zalikhanov M.Ch., Kolomyts E.G., Panov V.D., Dokukin M.D. Forecast of climate change in high-mountain landscapes and glaciation of the Greater Caucasus for the next decades. MGI., 1984. Issue. 51. P. 152–159. (In Russ.).
14. Kesheva L.A., Galaeva A.A., Stasenko D.V. Analysis of changes in the precipitation regime in different climatic zones of the central part of the North Caucasus. Svanidze (Georgia, September 27–29, 2011). Tbilisi, 2011. P. 76–79. (In Russ.).
15. Tashilova A.A. Analysis of climate change in Terskol over the past 60 years. Reports of the All-Russian Open Conference on Cloud Physics and Active Influences on Hydrometeorological Processes. Nalchik, September 8–10, 2021. Nalchik: Print Center Publishing House. P. 468–474. (In Russ.).
16. Tashilova A.A., Kesheva L.A., Balkarova S.B., Shogenova M.M., Pshikhacheva I.N., Taubekova Z.A. Structural analysis and forecast of winter precipitation using the Caterpillar-SSA method. Doklady AMAN. 2013. Vol. 15. No. 1. P. 103–106. (In Russ.).
17. Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary. St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2022. 124 p. (In Russ.).

**Статья поступила в редакцию 20.03.2023,
статья одобрена после рецензирования 25.07.2023,
статья принята к публикации 26.08.2023.**

**The article was submitted to the editorial office 20.03.2023,
the article was approved after reviewing 25.07.2023,
the article was accepted for publication 26.08.2023.**

Информация об авторах

- Аджиев Анатолий Хабасович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом стихийных явлений, Высокогорный геофизический институт, КБР, г. Нальчик, Scopus ID: 57204526436.
E-mail: adessa1@yandex.ru.
- Кондратьева Наталия Владимировна**, доктор географических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела стихийных явлений, Высокогорный геофизический институт, КБР, г. Нальчик. E-mail: kondratyeva_nat@mail.ru.
- Юрченко Наталья Владимировна**, младший научный сотрудник лаборатории атмосферного электричества, Высокогорный геофизический институт, КБР, г. Нальчик.
E-mail: ynatalya64@mail.ru.
- Шидугов Ислам Жирасланович**, инженер лаборатории гляциологии, Высокогорный геофизический институт, КБР, г. Нальчик. E-mail: shidugovislam@mail.ru.

Information about the authors

- Anatoly K. Adzhiev**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Phenomena, High-Mountain Geophysical Institute, KBR, Nalchik, Scopus ID: 57204526436.
E-mail: adessa1@yandex.ru.
- Natalia V. Kondratyeva**, Doctor of Geography, Associate Professor, Senior Researcher, Department of Natural Phenomena, High-Mountain Geophysical Institute, KBR, Nalchik.
E-mail: kondratyeva_nat@mail.ru.
- Natalya V. Yurchenko**, Junior Researcher, Laboratory of Atmospheric Electricity, High-Mountain Geophysical Institute, KBR, Nalchik, E-mail: ynatalya64@mail.ru.
- Islam Z. Shidugov**, engineer of the laboratory of glaciology of the High-Mountain Geophysical Institute, KBR, Nalchik.
E-mail: shidugovislam@mail.ru.

25.00.35
УДК 528.8
DOI:

ГЕОИНФОРМАТИКА
10.37493/2308-4758.2023.3.4

Антонов С. А.,
Перегудов С. В.

Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр,
г. Михайловск, Россия

**СРАВНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ
РЕЛЬЕФА**

Введение.

ГИС-технологии позволяют анализировать большие массивы пространственных данных, к которым относятся и цифровые модели рельефа, полученные на основе материалов дистанционного зондирования Земли. Они представляют собой важный источник данных для расчета и картографирования различных явлений и процессов, которые находятся в тесной взаимосвязи с рельефом и охватывают обширные территории. В статье представлены результаты оценки точности трех наиболее популярных глобальных цифровых моделей рельефа: ALOS World 3D, SRTM, ASTER.

Материалы и методы
исследований.

Оценка цифровых моделей рельефа проводилась на территории Буденновского городского округа Ставропольского края. Анализ ошибок морфометрических показателей был выполнен на основе сравнения исследуемых цифровых моделей рельефа и данными Государственного научно-внедренческого центра геоинформационных систем и технологий (ГосГисЦентр), которые были представлены в виде топографических карт. Анализ результатов исследования проводился на основе математико-статистических методов. Суммарная выборка сравниваемых точек составила 5322.

Результаты исследований
и их обсуждение.

На основании полученного массива данных каждой из цифровых моделей местности проведен сравнительный анализ выборок. В результате определено, что наименьшую точность показала модель ASTER. Данные проекта SRTM показали незначительные отклонения. Наибольшей точностью обладает цифровая модель рельефа, построенная на базе данных ALOS W3D.

Выводы.

Несмотря на то, что рассматриваемые цифровые модели местности имеют схожие характеристики, были обнаружены отличительные особенности каждой из них. Полученные данные позволят упростить выбор наиболее подходящей цифровой модели местности с учетом требований, необходимых для выполнения различных задач, а также повысить точность получаемых результатов.

Ключевые слова:

цифровая модель местности, ЦММ, точность ЦМР, цифровая модель рельефа, ЦМР

**Antonov S. A.,
Peregudov S. V.**

North Caucasian Federal Scientific Agrarian Center,
Mikhailovsk, Russia

Comparison of Digital Relief Models

Introduction.

GIS technologies make it possible to analyze large amounts of spatial data, which include digital elevation models derived from remote sensing data. They are an important source of data for calculating and mapping various phenomena and processes that are closely interrelated with the relief, and cover vast areas. The article presents the results of the accuracy assessment of the three most popular global digital elevation models: ALOS World 3D, SRTM, and ASTER.

Materials and research methods.

The evaluation of digital elevation models was carried out on the territory of Budennovsky urban district of Stavropol Krai. Error analysis of morphometric indicators was performed based on the comparison of the studied digital elevation models and the data of the State Research and Development Center of Geoformation Systems and Technologies – GosGisCenter, which were presented in the form of topographic maps. The analysis of the results of the study was carried out based on mathematical and statistical methods. The total sample of compared points equals 5322.

Research results and their discussion.

Based on the obtained dataset of each of the digital terrain models, a comparative analysis of the samples was carried out. As a result, it was determined that the ASTER model showed the lowest accuracy. SRTM project data showed insignificant deviations. The digital terrain model based on ALOS W3D data has the highest accuracy.

Conclusions.

Despite its popularity and at first glance similarity of the data, a number of features of each of the digital terrain models were identified. The data obtained will simplify the selection of a digital terrain model, taking into account the requirements needed to perform various tasks, as well as improve the accuracy of the results obtained.

Keywords:

digital elevation model, DEM, DTM accuracy, digital terrain model, DTM

Введение

Цифровые модели высот (Digital Elevation Model – DEM), полученные на основе данных дистанционного зондирования Земли, представляют собой ценные фундаментальные данные для различных наблюдений, в том числе связанных с сельским хозяйством – анализ эрозии, экспозиции пашни и т.д.

Цифровые модели высот делятся на 2 категории:

- цифровая модель местности (поверхности) (ЦММ) (от Digital Surface Model) и
- цифровая модель рельефа (ЦМР) (от Digital Terrain Model).

ЦММ отображает данные с учетом всех объектов, расположенных на поверхности (здания, лес и т.д.). ЦМР, напротив, отображает данные исключительно рельефа местности, без строений, лесов и т. д. [14].

Использование глобальных цифровых моделей высот позволяет получать различные морфометрические данные, которые используются как в прикладных работах, так и в научных [15].

При проведении наблюдений важно учитывать, что, несмотря на легкодоступность и распространенность, они имеют погрешности, вызванные сложным рельефом, деревьями, строениями и т.д. [16].

Картографирование различных показателей требует оценки точности данных. Точность ЦМР напрямую влияет на качество расчетов и технологические цепочки, поэтому важно выбрать наиболее подходящую цифровую модель с учетом цели, требований к точности и масштаба каждого исследования [17].

С учётом особенностей региона модели поверхности имеют различные показатели точности. Так в работе С.С. Рязанова на примере национального парка «Нижняя Кама» было определено, что данные SRTM и ASTER на участках с отсутствием древесной растительности ниже эталонных, а в модели ALOS они завышены [6].

В работе И.А. Ашаткина для оценки точности цифровых моделей местности использовались морфометрические показатели, такие как углы наклона и длины склонов. Сравнение результатов показало, что модели SRTM и AW3D30 более точно отображают углы наклона, в то время как модель ASTER GDEM v.2 более точно отображает длины склонов [2].

По данным наблюдений К.А. Мальцева, проводившихся в верховьях бассейна р. Ведуги, расположенного на восточном склоне

Среднерусской возвышенности, наибольшую точность показала модель SRTM [3].

Минеевым А.Л. установлено, что для Архангельской области наиболее подходящей из доступных цифровых моделей местности является ASTER GDEM [5].

Zhao Sh проведено сравнение двух цифровых моделей местности на территории Китая – ASTER GDEM и SRTM. В результате было определено, что наибольшую точность показала модель ASTER [24].

При анализе рельефа Филиппин с помощью ALOS, ASTER и SRTM Santillan было обнаружено, что все три модели преувеличивают значения высот. Однако измерения высоты с использованием AW3D30 были признаны наиболее точными [7].

Таким образом, можно сказать, что точность цифровых моделей высот является неоднородной.

В нашем исследовании цифровые модели местности, полученные от различных спутников, сравнивались для оценки их точности на территории Буденновского городского округа Ставропольского края. В рамках этого исследования были использованы данные наиболее популярных глобальных цифровых моделей, находящихся в свободном доступе: ASTER, SRTM и ALOS W3D.

Материалы и методы исследований

Запущенный в 2000 году национальным управлением США по аэронавтике и исследованию космического пространства (НАСА) проект Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) создал первую бесплатную глобальную цифровую модель поверхности для земель между 60° с. ш. и 59° ю. ш.

В 2017 году НАСА выпустило доработанную версию цифровой модели рельефа Shuttle Radar Topography Mission, известную как «SRTM Plus» или SRTM NASA Version 3, которая и использовалась в нашем исследовании [8].

SRTM v.3 представляет собой данные с разрешением в 1 угловую секунду (~30 м на экваторе), состоящие из 16-битных чисел со знаками, привязанными по горизонтали к Всемирной геодезичес-

кой системе 1984 года (WGS84) и по вертикали к Гравитационной модели Земли 1996 года (EGM96). Примечательно, что в применяемом датчике SAR S-диапазон использовался датчиком SRTM для измерения высоты наземных и не наземных объектов на поверхности Земли. Поскольку волна S-диапазона не может проникнуть сквозь густую растительность или здания, полученные данные представляют собой не только рельеф поверхности, но и объектов, расположенных на ней [18, 23]. Точность 30-метровой цифровой модели местности (ЦММ) SRTM, указанная производителем как абсолютная погрешность по высоте, составляет менее 16 м и относительная погрешность по высоте менее 10 м [11].

В 2009 году Министерство экономики и торговли промышленности (METI) Японии и НАСА выпустили усовершенствованный космический отражательный радиометр Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), охватывающий территорию между 83° с. ш. и 83° ю. ш., расширяя охват за пределы SRTM [12].

В июне 2009 года стал доступен глобальный набор данных о высоте ASTER DEM v.1. ЦММ ASTER была создана с использованием оптических изображений, полученных датчиком METI ASTER, установленным на спутник НАСА Terra. Модель была сгенерирована с использованием изображений стереопар.

В 2011 году была выпущена улучшенная версия ASTER DEM v.2 в 1 угловую секунду. По сравнению с версией ASTER DEM v.1, она улучшила пространственное разрешение, повысила точность по горизонтали и вертикали, а также обеспечила лучшую идентификацию водоемов за счет использования 260 000 дополнительных стереопар [20].

В 2019 году была выпущена ASTER Global DEM v.3, которая и использовалась при проведении исследования. Данная версия модели демонстрирует значительные улучшения по сравнению с предыдущей. Однако пользователям сообщается, что встречаются незначительные аномалии и артефакты [9].

ASTER DEM представляет собой 16-битные целые числа со знаком, привязанным по горизонтали к WGS84 и по вертикали к EGM96. За период наблюдения более 7 лет (2000–2007 гг.)

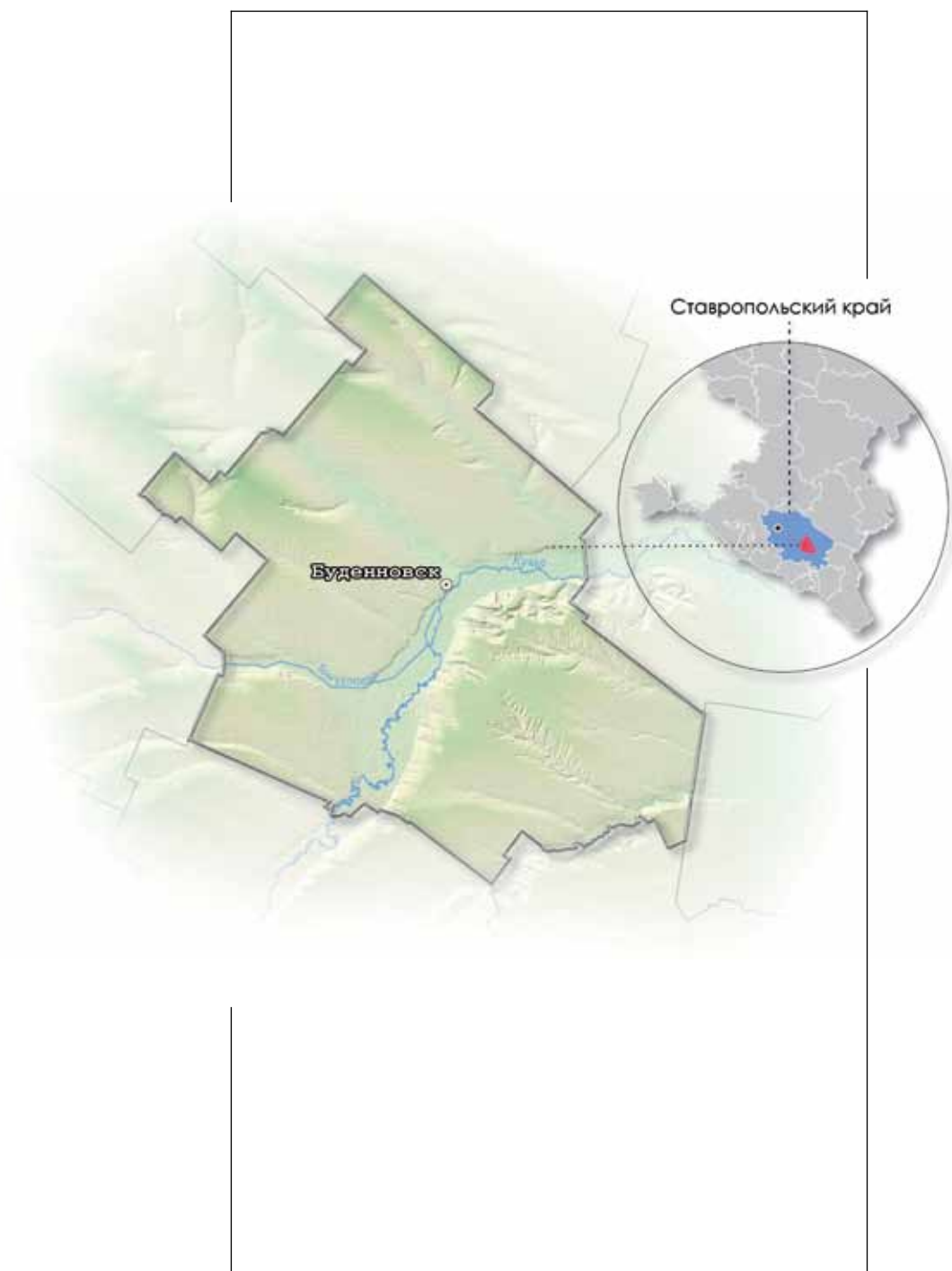


Рис. 1. Территория исследования.
Fig. 1. Study area.

было собрано около 1 260 000 сцен наборов стереоскопических данных ЦММ, каждая из которых покрывает площадь 60х60 км. При этом топография большинства регионов замерялась несколько раз [13].

В 2015 году в свободном доступе появилась глобальная цифровая модель местности Advanced Land Observing Satellite World 3D 30 v.1 – ALOS World 3D–30 m. Глобальные данные AW3D 30 DEM были получены с использованием измерений панхроматического прибора дистанционного зондирования для стереокартографирования PRISM. Оператор спутника – Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) с коммерческим партнером NTT Data Corporation и Японским центром технологий дистанционного зондирования (RESTEC).

Оптический датчик на борту ALOS применялся с 2006 по 2011 гг., используя пары стереоизображений PRISM с разрешением 2,5 м для создания глобальной ЦММ между широтами 80° с. ш. и 80° ю. ш. NTT Data и RESTEC распространяют цифровую модель местности высокого разрешения с размером пиксела приблизительно 5 м в коммерческих целях. JAXA сгенерировала цифровую модель местности размером 1° × 1° с разрешением в 1 угловую секунду (~30 м) путём повторной выборки 5-метровой ЦММ ALOS и выпустила эти данные под свободной лицензией в 2015 году [10]. Средние значения отметок модели представляют собой 16-битные числа со знаком, привязанным к горизонтальному WGS84 и вертикальному EGM96 датумам (характеристикам эллипсоида). Вертикальная точность матрицы высот, указанная производителем, составляет 5 м. Тем не менее, некоторые исследователи обозначают, что вертикальная точность AW3D30 не превышает 4,1 м [21, 22].

Для оценки точности моделей ASTER, SRTM и ALOS на территории Ставропольского края в качестве тестового участка была использована территория Буденновского городского округа (ГО) (рис. 1).

Общая площадь территории исследования составляет 3122 км². Буденновский ГО лежит на территории Терско-Кумской низменности в юго-восточной части Ставропольского края. Рельеф представ-

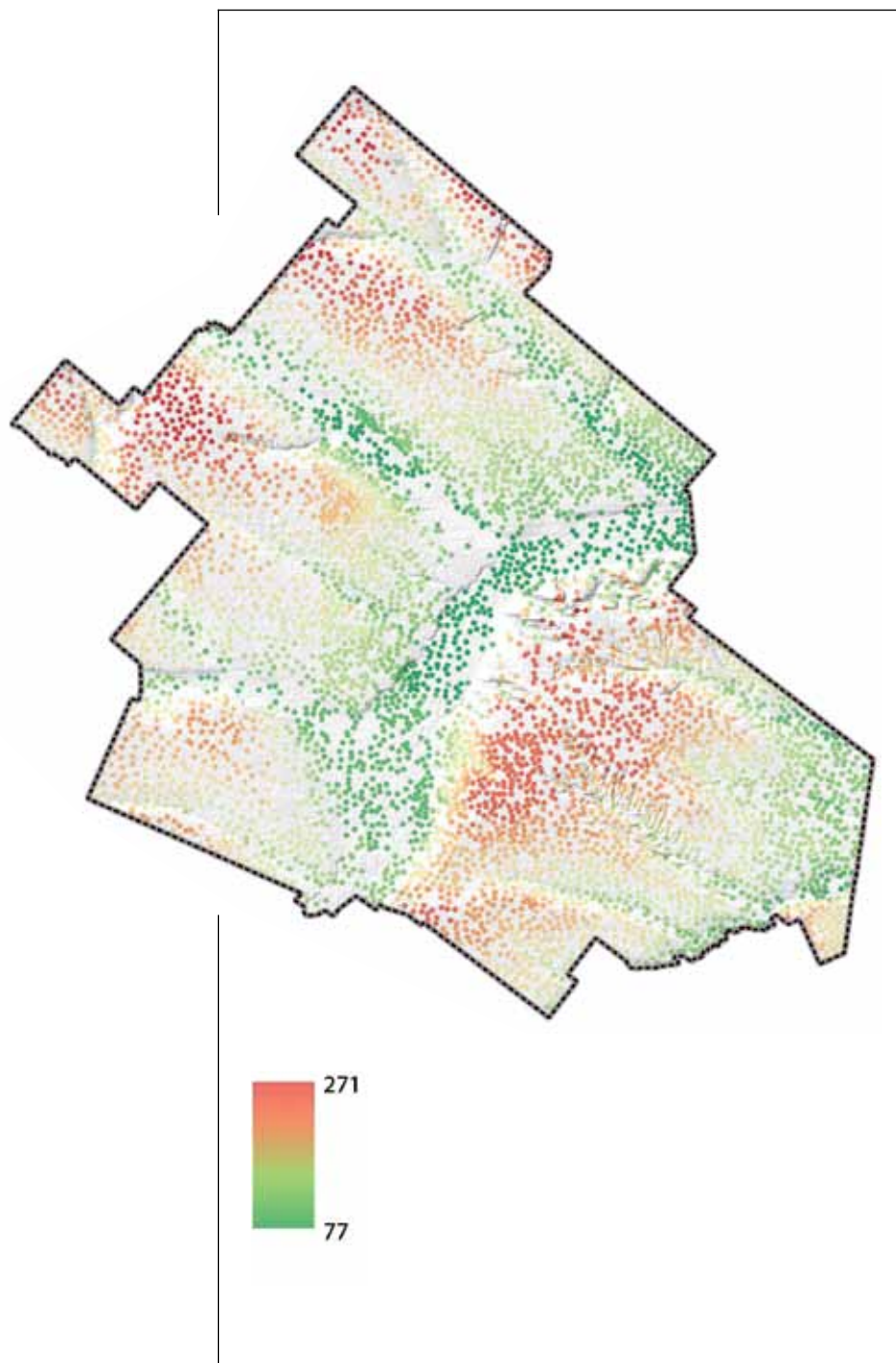


Рис. 2.

Распределение отметок высот на территории исследования.

Fig. 2. Distribution of elevations in the study area.

ляет собой плоскую низменную равнину. На западе равнина переходит в слегка приподнятую Прикумскую возвышенность. Местность сильно расчленена оврагами и балками.

Территория района подвержена сильной антропогенной нагрузке, поскольку на территории района ведется активная сельскохозяйственная деятельность. По данным наблюдений 2022 года распаханность 81 % территории [1].

В качестве эталона высот использовались данные с топографических планов Государственного научно-внедренческого центра геоинформационных систем и технологий (ГосГисЦентр – ГГЦ) масштабом 250 м [4]. Они были созданы в 2000-х годах в качестве гражданской альтернативы советским топографическим планам Генштаба, имеющим ограничения по пользованию.

Для оценки точности DEM на топографических планах были оцифрованы отметки высот с последующим созданием буферных зон диаметром 1 м и определением зональной статистики по каждой цифровой модели высот. Суммарная выборка составила 5322 точки (рис. 2).

Наблюдения проводились с помощью бесплатного программного комплекса QGIS v.3.22.7. с открытым исходным кодом, широко используемым во всем мире.

В дополнение к основному программному обеспечению в QGIS существует широкий спектр модулей, подготовленных сообществом QGIS и многими образовательными и исследовательскими группами. Данная программа позволяет проводить широкий спектр наблюдений, в частности при работе с ЦММ создает модели крутизны склона, экспозиции, теневое рельефа.

Для визуализации распределения выборок применялась формула Стерджесса, которая позволяет определить величину интервала без предварительного установления числа групп. Расчет проводился согласно формулам 1 и 2 [19].

$$k = 1 + 3.322 \log N, \quad (1)$$

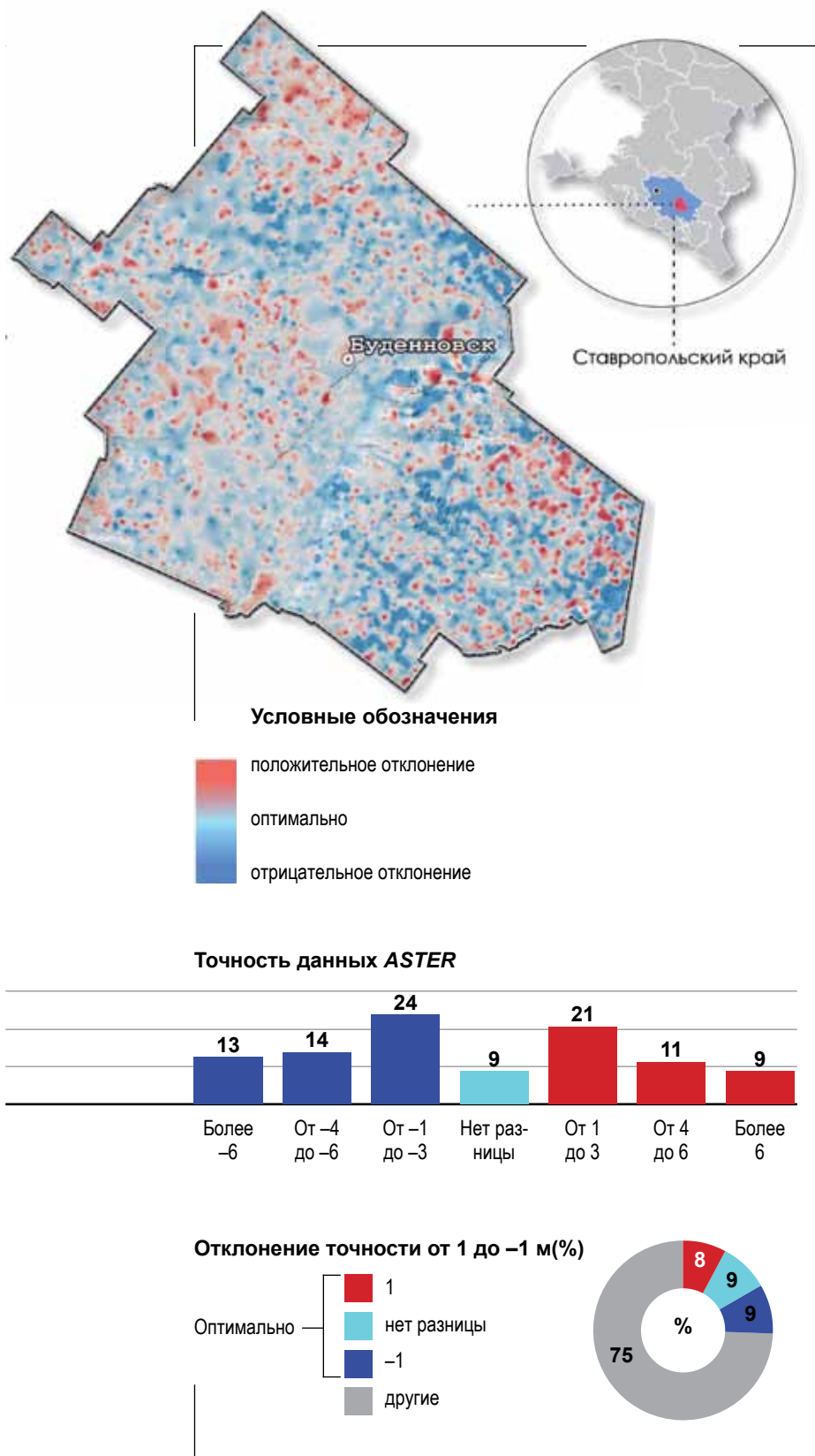


Рис. 3.

Результаты анализа данных ASTER.

Fig. 3. Results of ASTER data analysis.

$$i = \frac{x_{max} - x_{min}}{k}, \quad (2)$$

где N – количество значений выборки,
 k – число групп,
 $x_{max/min}$ – максимальное и минимальное значение в выборке,
 i – интервал.

Применение этих формул целесообразно при большом числе единиц совокупности, при этом используются равные интервалы. По полученным данным была построена гистограмма распределения, которая в дальнейшем трансформирована в полигон распределения. Также для анализа выборки использовались различные показатели описательной статистики.

Результаты исследований и их обсуждение

В результате проведенного исследования на территории Буденновского городского округа при использовании материалов ASTER DEM в выборке полученных данных отмечается сильный разброс высот относительно топографического плана ГосГисЦентра (рис. 3).

Так, 41 % отметок высот имеют значения выше, чем на топоплане, а 50 % лежат ниже, чем по данным ГГЦ. Соответствуют только 464 (9 %) точки.

В целом, разница положительных и отрицательных отклонений в рамках муниципального образования носит характер равномерного распределения.

Одним из показателей точности был выбран диапазон отклонений в пределах от -1 до 1 м. Для цифровой модели местности ASTER в этом регионе в оптимальный диапазон входит 1352 точки, что составляет 25 %.

По результатам использования материалов проекта SRTM в рамках Буденновского ГО был проведен анализ и выявлен ряд особенностей. Большая часть отметок высот имеет отрицательное отклонение относительно данных ГосГисЦентра. Так 78 % отметок высот расположены ниже, чем на топоплане, что на 27 % боль-

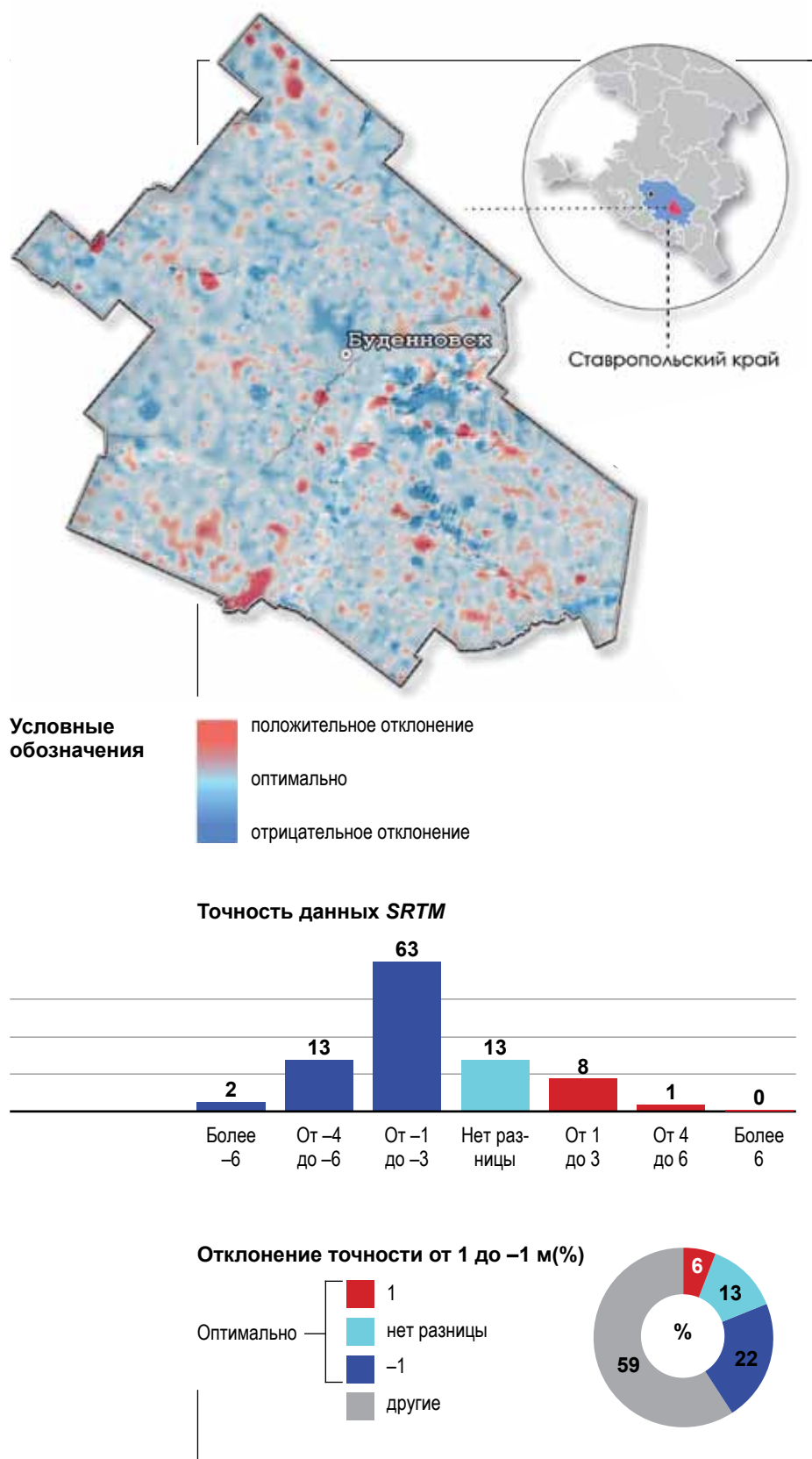


Рис. 4.

Результаты анализа данных SRTM.

Fig. 4. Results of SRTM data analysis.

ше, чем по материалам ASTER (рис. 4). В категорию отметок высот, расположенных выше относительно данных ГГЦ, вошли 9 % данных, что на 32 % меньше, чем по результатам использования ASTER. И только 13 % совпадают с отметками высот топографического плана.

Для этой цифровой модели высот в рамках данной территории отмечается концентрация значений, смещенных в отрицательную сторону в диапазоне от -1 до -3 м. К этой категории относится 63 % точек. В выборке значений с положительным отклонением наибольшая концентрация также отмечается в интервале от 1 до 3 и составляет 8 %.

В рамках оценки точности были выявлены высоты с отклонением от -1 до 1 м. В диапазон данных, удовлетворяющих условиям оптимальности точности, вошли 2194 точки, что составляет 41 %. Наибольшее количество отклонений отмечается на крутых склонах балок и на участках, покрытых деревьями (пойма р. Кума).

В результате использования модели ALOS World 3D в данной местности были определены различные особенности. Как и в модели SRTM, большая часть отметок имеет отрицательное отклонение. В эту категорию вошло 66 % полученных отметок высот, что на 12 % меньше, чем по материалам SRTM (рис. 5).

Вместе с этим отмечаются значения, характеризующиеся положительным отклонением относительно данных топографического плана. К этой категории относится 20 % отметок высот, что на 21 % меньше, чем в данных ASTER и на 11 % больше, чем в результатах по материалам SRTM. Совпадения отметок высот выявлены у 14 % данных.

Наибольшая концентрация отклонений отмечается в отрицательной выборке данных, входящих в диапазон от 1 до -1 м – 51 %. Категория, включающая положительные отклонения, с наибольшей концентрацией отметок высот отмечается в диапазоне от 1 до -1 м и составляет 17 %, что на 9 % больше, чем по данным SRTM.

В оптимальный диапазон при использовании ALOS DEM вошли 2261 отметка высоты, что составляет 42 %. Наибольшее количество значений, имеющих вертикальное отклонение относительно топоплана, отмечается в западной, наиболее приподня-

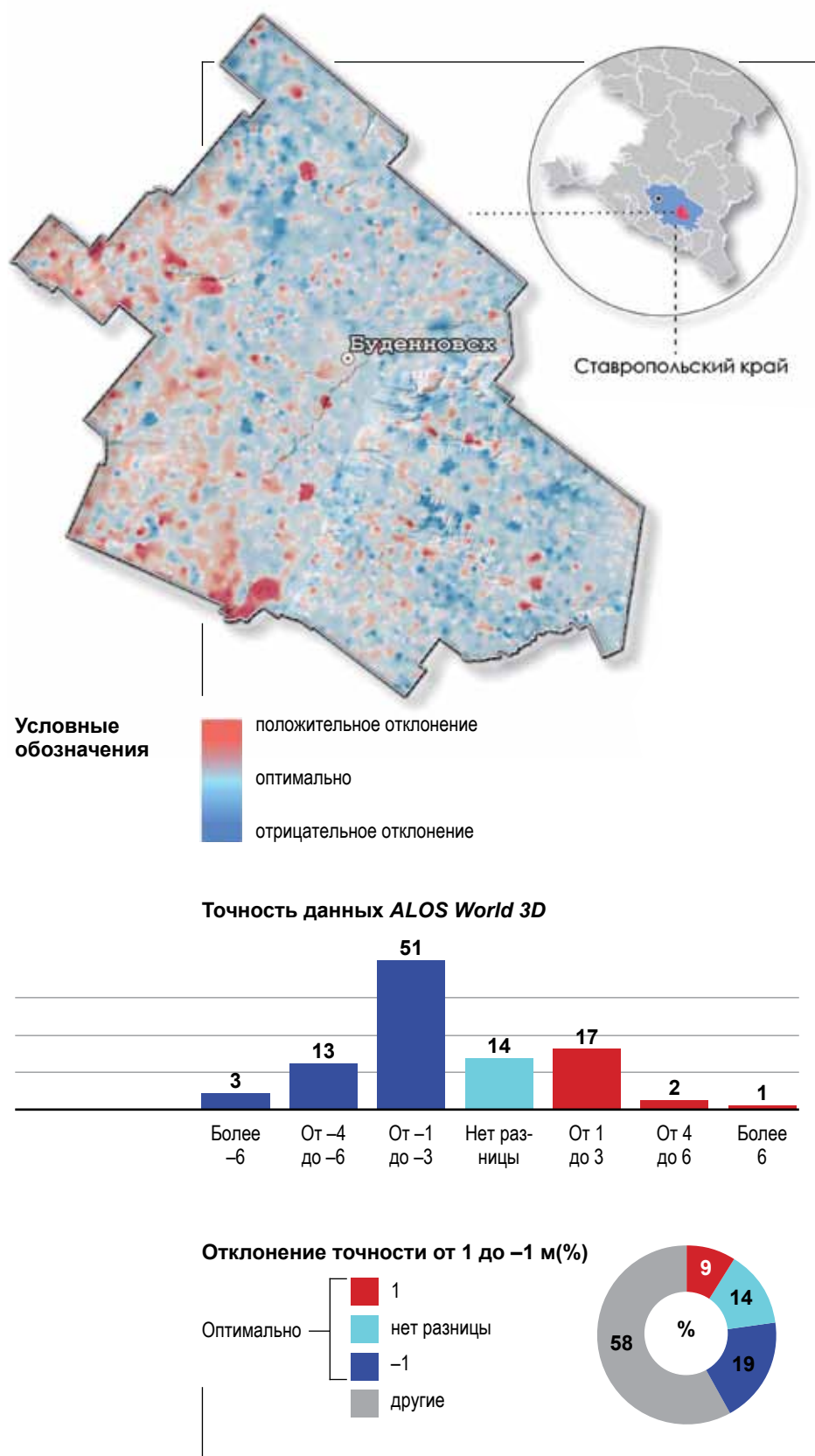


Рис. 5.

Результаты анализа данных ALOS World 3D.

Fig. 5. Results of ALOS World 3D data analysis.

той, части муниципального образования. Также отклонения отмечаются на крутых склонах балок, оврагов и территориях, покрытых деревьями.

Для оценки объективности полученных данных проводился математический анализ выборок цифровых моделей местности по показателям описательной статистики, при использовании которых были получены определенные результаты, отраженные в таблице 1.

По данным, полученным в ходе анализа выборок, был построен полигон распределения частот (рис. 6).

Наиболее значительные отклонения между распределениями частот отмечаются по модели ASTER, а по SRTM и ALOS они минимальны. Однако модель ALOS имеет версии с более высоким пространственным разрешением, на основе которых она и была построена, что позволяет получать более достоверные результаты.

Таблица 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СРАВНИВАЕМЫХ МОДЕЛЕЙ МЕСТНОСТИ

Table 1. Results of mathematical analysis of compared terrain models

	Топоплан	ALOS	SRTM	ASTER
Среднее	157,96	156,62	156,14	157,4
Дисперсия выборки	1397,54	1406,24	1401,24	1445,96
Стандартная ошибка	0,51	0,51	0,51	0,52
Мода	134	130	147	139
Стандартное отклонение	37,38	37,50	37,50	38,03
Эксцесс	-0,61	-0,59	-0,60	-0,57
Асимметрия	0,15	0,15	0,14	0,13

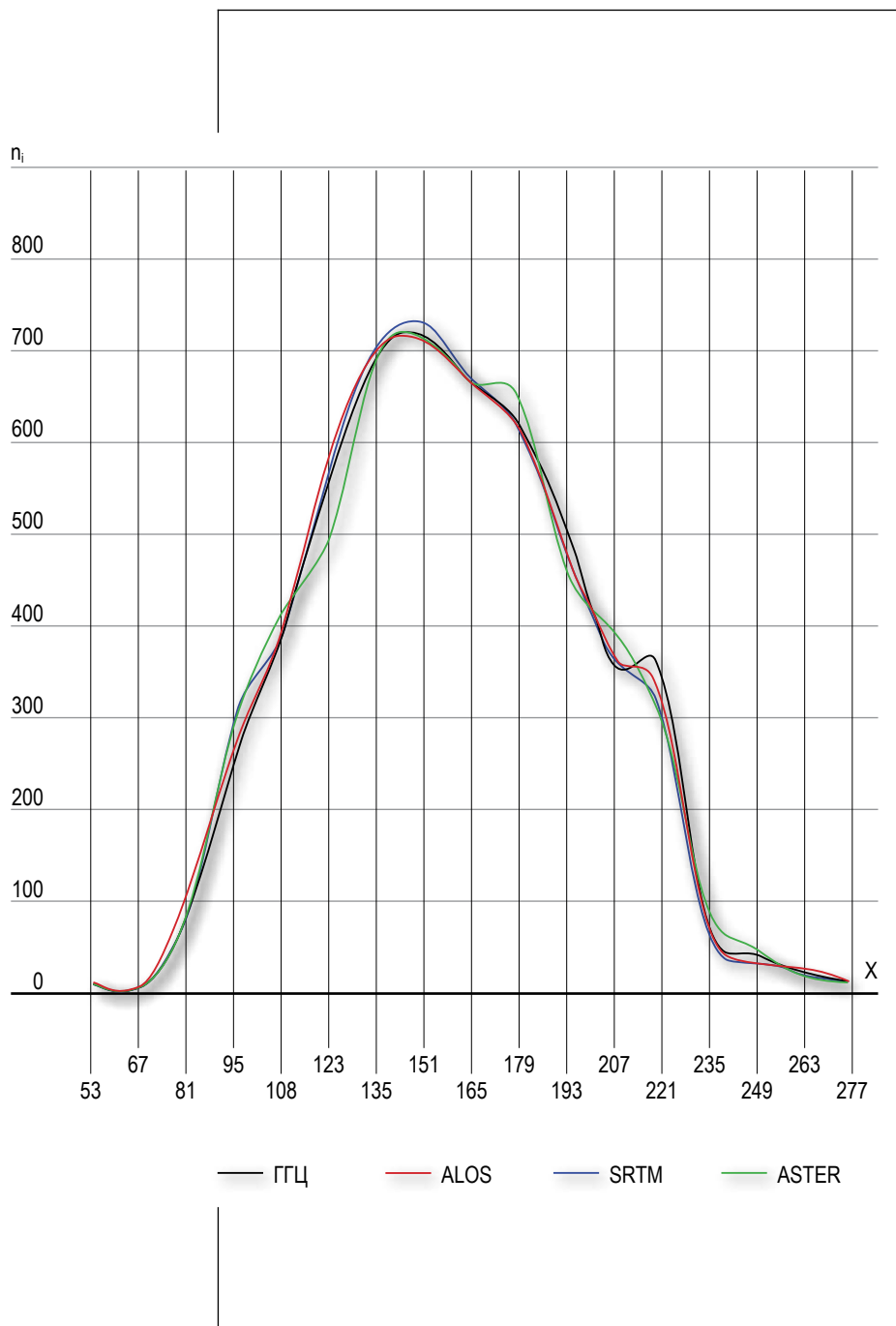


Рис. 6.

Распределение частот выборки по формуле Стерджесса: n_i – частота встречаемости, X – середина интервала высот.

Fig. 6. Sampling frequency distribution according to the Sturges formula.

Выводы

Цифровые модели местности являются важными источниками данных для различных задач. В работе были приведены данные сравнения трех цифровых моделей высот, находящихся в открытом доступе на примере территории Буденновского городского округа Ставропольского края.

В результате получены локальные данные о точности цифровых моделей местности, которые свидетельствуют о том, что наибольшее отклонение данных отмечается в модели ASTER. Модель проекта SRTM показала незначительные отклонения точности. Из всех анализируемых моделей наибольшую точность на данной территории показала ЦММ ALOS W3D, которая является продуктом генерализации коммерческой версии ALOS.

Для задач, требующих использования цифровых моделей местности, на территории Ставропольского края и в частности Буденновского городского округа рекомендуется использовать данные ALOS W3D, они обладают наибольшей точностью.

Результаты исследования помогут выбрать наиболее подходящую цифровую модель местности в зависимости от требований для различных задач и повысить точность получаемых результатов.

Библиографический список

1. Антонов С.А., Перегудов С.В. Геоинформационный мониторинг пашни засушливой зоны Ставропольского края // Инновационные научные разработки – развитию агропромышленного комплекса: материалы юбилейной международной научно-практической конф. ФГБНУ «Северо-Кавказский ФНАЦ». Ставрополь, 2022. № 6. С. 239–245.
2. Ашаткин И.А., Мальцев К.А., Гайнутдинова Г.Ф. и др. Анализ морфометрии рельефа по глобальным ЦМР в пределах южной части Европейской территории России // Ученые записки казанского университета. 2020. № 162 (4). С. 612–628.
3. Мальцев К.А., Голосов В.Н., Гафуров А.М. Цифровые модели рельефа и их использование в расчётах темпов смыва почв на пахотных землях // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2018. № 160 (3). С. 514–530.
4. Маршруты. ру [Электронный ресурс]. URL: <https://maps.>

marshruty.ru/? y=45.360027&x=41.925072&z=9&t=topomap.
(Дата обращения: 06.02.2023).

5. Минеев А.Л., Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Полякова Е.В. Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // Пространство и время. 2015. № 3. С. 278–291.
6. Рязанов С.С., Кулагина В. И. Сравнительная оценка вертикальной точности цифровых моделей высот – SRTM, ALOS WORLD 3D, ASTER GDEM и MERIT DEM на примере лесной и пойменной зоны национального парка «Нижняя Кама» // Геосферные исследования. 2022. № 1. С. 107–117.
7. Santillan J.R., Makinano-Santillan M., Makinano R.M. Vertical accuracy assessment of ALOS World 3D – 30M Digital Elevation Model over northeastern Mindanao, Philip-pines. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing. 2016. P. 5374–5377.
8. 30-Meter SRTM Tile Downloader [Электронный ресурс]. URL:<https://dwtkns.com/srtm30m/> (Дата обращения: 31.02.2023).
9. Abrams M., Crippen R., Fujisada H. ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD). Remote Sens. 2020. No. 12. N. 1156.
10. Abrams M., Bailey B., Tsu H., Hato M. The aster global DEM. Photogramm. Eng. Remote Sensing. 2010. No. 76. P. 344–348.
11. Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models. IJGI. 2018. No. 3 (7). P. 114–117.
12. ASTER Global Digital Elevation Map Announcement [Электронный ресурс]. URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. (Дата обращения: 30.01.2023).
13. Earth-graphy [Электронный ресурс]. URL: <https://earth.jaxa.jp/ja/data/>. (Дата обращения: 30.01.2023).
14. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L. The shuttle radar topography mission. Reviews Geophysics. 2007. No. 2 (45). P. 1–33.
15. Gómez-Gutiérrez A., Schnabel S., Contador F.L., García Marín R. Testing the quality of open-access DEMs and their derived attributes in Spain: SRTM, GDEM and PNOA DEM. Geomorphometry. 2011. P. 53–56.
16. James M.R., Robson S. Straightforward reconstruction of 3D

- surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2012. No. 13 (117). P. 1–17.
17. Pike R., Evans I., Hengle T. *Geomorphometry: A brief guide. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications.* Amsterdam: Elsevier, 2009. P. 3–30.
 18. Saleem N., Huq M., Twumasi N.Y.D., Javed A., Sajjad A. Parameters derived from and/or used with digital elevation models (DEMs) for landslide susceptibility mapping and land-slide risk assessment: A review. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2019. No. 12 (8). P. 1–25.
 19. Sturges H. A. The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association.* 1926. № 153(21). P. 65–66.
 20. Tachikawa T., Kaku, M., Iwasaki, A. Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., Danielson, J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J. *ASTER Global Digital Elevation Model Version 2- Summary of Validation Results.* NASA. 2011. [Электронный ресурс]. URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search> (Дата обращения: 16.02.23).
 21. Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2014. No. 2 (4). P. 71–76.
 22. Tadono T., Takaku J., Tsutsui, K., Oda F., Nagai H. Status of ALOS World 3D (AW3D) global DSM generation. *Proc. 2015 IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS).* 2015. P. 3822–3825.
 23. U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data [Электронный ресурс]. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/news/us-releases-enhanced-shuttle-land-elevation-data> (Дата обращения: 16.02.2023).
 24. Zhao Sh., Cheng W., Zhou Ch., Chen X., Zhang Sh., Zhou Z., Liu H., Chai H. Accuracy assessment of the ASTER GDEM and SRTM3 DEM: An example in the Loess Plateau and North China Plain of China. *Int. J Remote Sens.* 2011. No. 23 (32). P. 8081–8093.

References

1. Antonov S.A., Peregudov S.V. Geoinformation monitoring of arable land in the arid zone of the Stavropol Territory. *Innovative scientific developments for the development of the agro-industrial complex: Proceedings of the anniversary in-*

- ternational scientific and practical conference. FGBNU "North Caucasian FNAC". Stavropol, 2022. No. 6. P. 239–245. (in Russ).
2. Ashatkin I.A., Maltsev K.A., Gainutdinova G.F. etc. Analysis of relief morphometry based on global DEMs within the southern part of the European territory of Russia. *Uchenye zapiski kazanskogo universiteta*. 2020. № 162 (4). P. 612–628. (in Russ).
 3. Maltsev K.A., Golosov V.N., Gafurov A.M. Digital elevation models and their use in calculating the rate of soil erosion on arable land. *Uchen. app. Kazan. university ser. Natural. Sciences*. 2018. No. 160 (3). P. 514–530. (in Russ).
 4. Routes. Ru [Electronic resource]. URL: <https://maps.marshruty.ru/?y=45.360027&x=41.925072&z=9&t=topomap>. (Accessed 06.02.2023). (in Russ).
 5. Mineev A.L., Kutinov Yu.G., Chistova Z.B., Polyakova E.V. Preparation of a digital relief model for the study of exogenous processes in the northern territories of the Russian Federation. *Space and Time*. 2015. No. 3. P. 278–291. (in Russ).
 6. Ryazanov S.S., Kulagina V.I. Comparative evaluation of the vertical accuracy of digital elevation models – SRTM, ALOS WORLD 3D, ASTER GDEM and MERIT DEM on the example of the forest and floodplain zone of the Nizhnyaya Kama National Park. *Geosfernye issledovaniya*. 2022. No. 1. P. 107–117. (in Russ).
 7. Santillan J.R., Makinano-Santillan M., Makinano R.M. Vertical accuracy assessment of ALOS World 3D – 30M Digital Elevation Model over northeastern Mindanao, Philip-pines. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Beijing. 2016. P. 5374–5377.
 8. 30-Meter SRTM Tile Downloader [Electronic resource]. URL: <https://dwtkns.com/srtm30m/>. (Accessed 31.02.2023).
 9. Abrams V., Baily B., Tsu H., Hato M. The ASTER global DEM. *Photogramm. Remote Sensing*. 2010. No 76. P. 344–348.
 10. Abrams M., Crippen R., Fujisada H. ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD). *Remote Sens*. 2020. No. 12. N. 1156.
 11. Alganci U., Besol B., Sertel E. Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models. *IJGI*. 2018. No 3 (7). P. 114–117.
 12. ASTER Global Digital Elevation Map Announcement [Electronic resource]. URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>. (Accessed 30.01.2023).

13. Earth-graphy [Electronic resource]. URL: <https://earth.jaxa.jp/ja/data/>. (Accessed 30.01.2023).
14. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L. The shuttle radar topography mission. *Reviews Geophysics*. 2007. No. 2 (45). P. 1–33.
15. Gómez-Gutiérrez A., Schnabel S., Contador F.L., García Marín R. Testing the quality of open-access DEMs and their derived attributes in Spain: SRTM, GDEM and PNOA DEM // *Geomorphometry*. 2011. P. 53–56.
16. James M.R., Robson S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 2012. No. 13 (117). P. 1–17.
17. Pike R., Evans I., Hengle T. *Geomorphometry: A brief guide. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Amsterdam: Elsevier, 2009. P. 3–30.
18. Saleem N., Huq M., Twumasi N.Y.D., Javed A., Sajjad A. Parameters derived from and/or used with digital elevation models (DEMs) for landslide susceptibility mapping and land-slide risk assessment: A review. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2019. No. 12 (8). P. 1–25.
19. Sturges A. The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association*. 1926. No. 153(21) P. 65–66.
20. Tachikawa T., Kaku, M., Iwasaki, A. Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., Danielson, J., Krieger, T., Curtis, B., Haase, J. *ASTER Global Digital Elevation Model Version 2- Summary of Validation Results*. NASA. 2011 [Electronic resource]. URL: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>. (Accessed 16.02.23).
21. Tadono T., Ishida H., Oda F., Naito S., Minakawa K., Iwamoto H. Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2014. No. 2 (4). P. 71–76.
22. Tadono T., Takaku J., Tsutsui, K., Oda F., Nagai H. Status of ALOS World 3D (AW3D) global DSM generation. *Proc. 2015 IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. (IGARSS)*. 2015. P. 3822–3825.
23. U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data [Electronic resource]. URL: <https://www.jpl.nasa.gov/news/us-releases-enhanced-shuttle-land-elevation-data> (Accessed 16.02.2023).

24. Zhao Sh., Cheng W., Zhou Ch., Chen X., Zhang Sh., Zhou Z., Liu H., Chai H. Accuracy assessment of the ASTER GDEM and SRTM3 DEM: An example in the Loess Plateau and North China Plain of China. Int. J Remote Sens. 2011. No 23 (32). P. 8081–8093.

**Статья поступила в редакцию 06.04.2023,
статья одобрена после рецензирования 25.08.2023,
статья принята к публикации 10.09.2023.**

**The article was submitted to the editorial office 06.04.2023,
the article was approved after reviewing 25.08.2023,
the article was accepted for publication 10.09.2023.**

Информация об авторах

Антонов Сергей Анатольевич, кандидат географических наук, зав. лабораторией ГИС-технологий, Северо-Кавказский ФНАЦ.

E-mail: santosb@mail.ru

Перегудов Сергей Владимирович, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории ГИС-технологий, Северо-Кавказский ФНАЦ.

E-mail: serjoSW@yandex.ru

Information about the authors

Sergey A. Antonov, Candidate of Geographical Sciences, Head of the GIS Technology Laboratory, Federal State Budgetary Scientific Institution "North Caucasian Federal Scientific Agrarian Center".

E-mail: santosb@mail.ru

Sergey V. Peregudov, Graduate Student, Junior Researcher at the GIS Technology Laboratory, Federal State Budgetary Scientific Institution "North Caucasian Federal Scientific Agrarian Center".

E-mail: serjoSW@yandex.ru

1.6.21. ГЕОЭКОЛОГИЯ
УДК 504.056; 873.33.31.23
DOI: 10.37493/2308-4758.2023.3.5

Разумов В. В., Высокогорный геофизический институт Росгидромета,
Федченко Л. М., г. Нальчик, Россия;
Разумова Н. В., Российские космические системы Роскосмоса, г. Москва, Россия;
Богданова Н. Д., Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве,
г. Москва, Россия;
Шальнев В. А. Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь,
Россия

МАСШТАБЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И АКТИВНОСТЬ ПРОЯВЛЕНИЯ ОБВАЛЬНО-ОСЫПНЫХ ПРОЦЕССОВ В КАРАЧАЕВО-ЧЕРКЕССКОЙ РЕСПУБЛИКЕ

Введение. На территории Карачаево-Черкесской Республики довольно значительное распространение получили обвально-осыпные процессы, развитие преимущественно в горных районах республики. В статье приводится оценка масштабов распространения, активности и опасности проявления обвально-осыпных процессов на территории республики за 2005–2022 гг.

Материалы и методы исследований. Ключевым методом, применяемым в работе, стал анализ различных материалов, содержащих информацию об активности проявления обвально-осыпных процессов на территории Карачаево-Черкесской Республики. В качестве основных использовались литературные источники, отчеты и опубликованные данные Центра государственного мониторинга состояния недр ФГБУ «Гидроспецгеология» за 2005–2022 гг.

Результаты исследований и их обсуждение. Авторами охарактеризованы условия и причины, масштабы распространения, а также оценена активность и опасность обвально-осыпных проявлений, произошедших на территории Карачаево-Черкесской Республики за 2005–2022 гг. В работе приведены сведения о масштабах разрушений и деформаций населенных пунктов и хозяйственных объектов под воздействием этих процессов.

Выводы. Приведены сведения о местоположении обвально-осыпных проявлений на территории Карачаево-Черкесской Республики и их характеристиках, масштабах разрушений и деформаций, вызванных ими. За изучаемый период времени на территории республики зафиксировано более 90 значимых обвально-осыпных проявлений, объемы которых не превышали 1000–1500 м³. Наибольший размах обвально-осыпной деятельности отмечался в 2006, 2007 и 2010 гг., а очень слабая степень активизации наблюдалась в 2017, 2020 и 2022 гг. Большинство активных обвально-осыпных участков (более 85 %) было зафиксировано на автомобильных дорогах республики. Наиболее значимая степень их активизации отмечалась в Карачаевском и Зеленчукском административных районах республики.

Ключевые слова: обвалы и осыпи, обвально-осыпные процессы, активизация, проявления

Razumov V. V., High-Mountain Geophysical Institute of Roshydromet,
Fedchenko L. M., Nalchik, Russia;
Razumova N. V., Russian Space Systems of Roscosmos, Moscow, Russia;
Bogdanova N. D. Institute of Geotechnics and Engineering Surveys in Construction,
Moscow, Russia;
Shalnev V.A. North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

The Extent of the Spread and Activity of the Manifestation of Avalanche-Talus Processes in the Karachay-Cherkess Republic

Introduction. Avalanche-talus processes have become common mainly in the mountainous regions of the Karachay-Cherkess Republic. The article provides an assessment of the extent of the spread, activity and danger of avalanche-talus processes on the territory of the republic over 2005–2022.

Materials and research methods. The key method used in this work was the analysis of various materials containing information on the activity of the manifestation of avalanche-talus processes on the territory of the Karachay-Cherkess Republic. Literary sources, reports and published data of the Center for State Monitoring of the State of the Subsoil of the Federal State Budgetary Institution «Hydrospetsgeology» over the period of 2005–2022 served the main sources of the analysis.

Research results and their discussion. The authors characterize the conditions and the causes, the extent of the spread, and assess the activity and danger of avalanche-talus manifestations that occurred on the territory of the Karachay-Cherkess Republic in 2005–2022. The paper provides information on the extent of destruction and deformation of settlements and economic objects under the influence of these processes.

Conclusions. Information is given on the location of avalanche-talus manifestations on the territory of the Karachay-Cherkess Republic and their characteristics, the extent of destruction and deformation caused by them. Over the period in question, more than 90 significant avalanche-talus manifestations were recorded on the territory of the republic, the volumes of which did not exceed 1000–1500 m³. The largest scale of landslide-scree activity was observed in 2006, 2007 and 2010, and a low degree of activity was observed in 2017, 2020 and 2022. The majority of active landslide-talus sites (more than 85 %) were recorded on the highways of the republic. The most significant degree of their activity was noted in the Karachay and Zelenchuk administrative districts of the republic.

Keywords: landslides and scree, landslide-scree processes, activation, manifestations

Введение

Территория Карачаево-Черкесской Республики характеризуется сложным геологическим и геоморфологическим строением. В ее рельефе выделяются три высотные зоны: равнинная, предгорно-низкогорная и средне-высокогорная. Краткая характеристика этих зон приводится по данным [1, 10, 12, 15, 17].

Рельеф равнинной части холмисто-волнистый с отметками высот от 400 до 700 м н.у.м., снижающимися на север и северо-запад. На севере республики эта зона сливается с Предкавказской равниной, на востоке, в районе Черкесского водохранилища, образует платообразную поверхность правобережной террасы реки (р.) Кубань, а на юге доходит до северных склонов Пастбищного хребта. Границей между равнинной и предгорной зоной условно можно считать линию, идущую южнее аула (а.) Бесленей, на город (г.) Черкесск, севернее села (с.) Николаевское и далее на восток к границе республики (рис. 1).

Южнее этой линии широкой полосой протяженностью в 150–160 км вытянулась предгорно-низкогорная зона. Ее южную границу также условно можно провести от с. Курджиново на станицу (ст.) Зеленчукская, затем на а. Верхняя Мара и плато Бийчесын. Зону отличают четко выраженные водораздельные пространства. Высоты здесь постепенно растут к югу, поверхность пересечена балками и короткими ущельями рек. В пределах данной зоны находятся крупные орографические объекты – Пастбищный и Скалистый хребты, а также межуэстовая депрессия между ними. Пастбищный хребет, расположенный севернее Скалистого, более низкогорный, его средние высоты – 1100–1300 м н.у.м., а на востоке достигают 1500 м н.у.м. Скалистый хребет протянулся по территории республики с запада на восток на 160 км, его средние высоты – 1200–1600 м н.у.м., максимальные – свыше 2600 м н.у.м.

Средне-высокогорная зона, самая обширная в республике, включает всю восточную часть Скалистого хребта, а также Передовой и Главный Кавказский хребты, разделенные Северо-Юрской и Загедано-Архызской депрессиями.

Четвертичные отложения на территории республики представлены различными генетическими типами: аллювиальными, делювиальными, коллювиальными, водно-ледниковыми, ледниковыми,

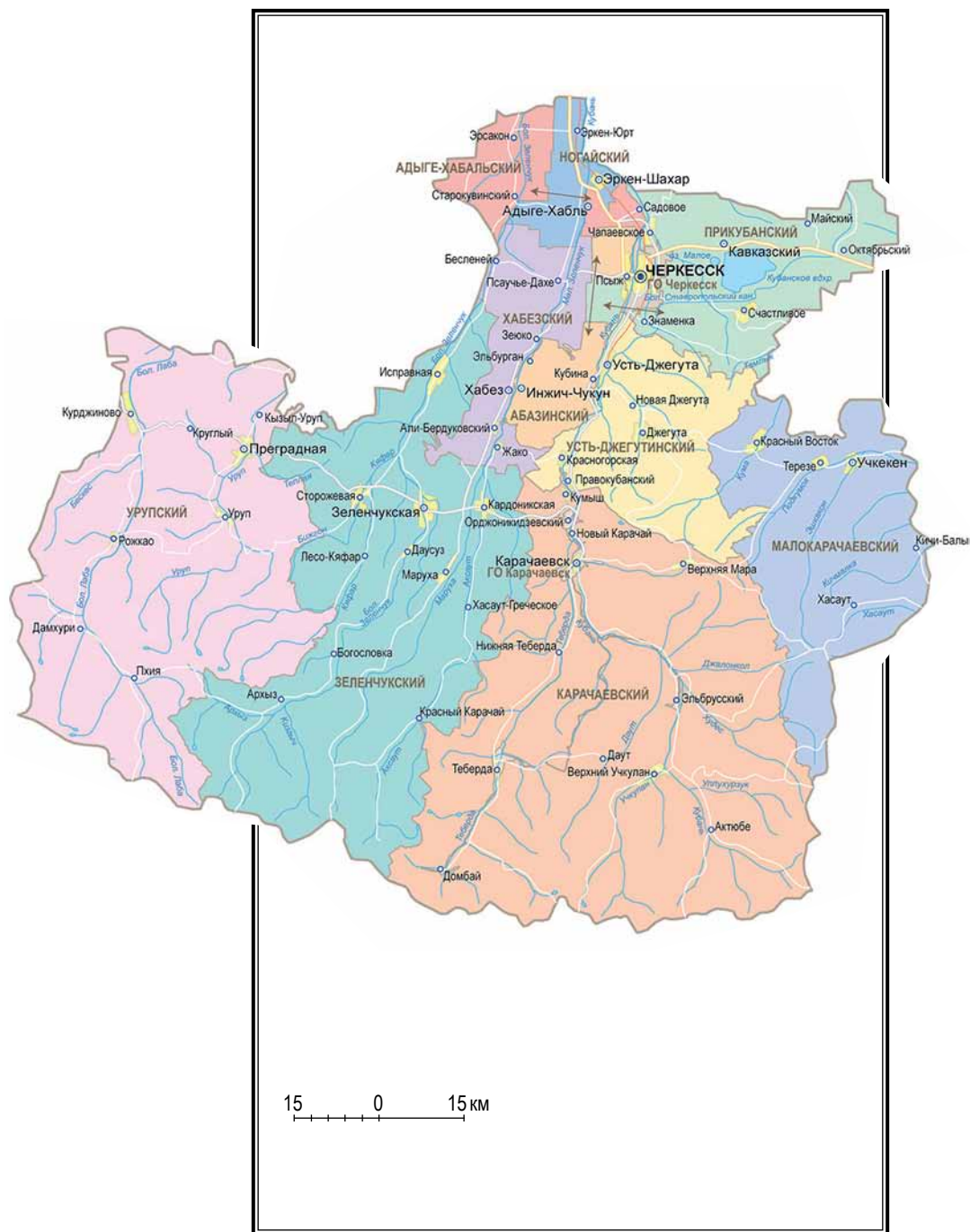


Рис. 1.

Карачаево-Черкесская Республика

http://swww.sharada.ru_mod_filesce_imageseshopaoeg48.jpg.

Fig. 1. Karachay-Cherkess Republic

http://swww.sharada.ru_mod_filesce_imageseshopaoeg48.jpg.

пролювиальными, гравитационно-оползневыми. Аллювиально-деллювиальные образования широко распространены на территории внутригорных впадин. Аллювиальные отложения в долинах рек представлены галечным материалом магматических и метаморфических пород, деллювиальные – тяжелыми суглинками и легкими глинами, пролювиальные – суглинками и легкими глинами с переменным содержанием щебня [13, 16, 17, 19].

На территории Карачаево-Черкесской Республики довольно значительное распространение получили обвально-осыпные процессы. Они отмечены преимущественно в горных районах республики. В области средне-низкогорного рельефа фиксируется слабая пораженность территории, а области межгорной северо-юрской депрессии и высокогорного рельефа республики характеризуется средней степенью пораженности обвально-осыпными процессами [5-8].

Под обвалами и осыпями, согласно Части II «Правила производства работ в районах развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов» СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства», понимается обрушение (опрокидывание, падение, качение) масс горных пород на склоне (в виде крупных и мелких глыб – обвалы; щебня и дресвы – осыпи) в результате их отрыва от коренного массива. Обвалы образуются на склонах крутизной более 45° , а осыпи – на склонах, крутизна которых, в основном, превышает 30° [11, 18]. Обвально-осыпные процессы происходят в результате ослабления связности горных пород под воздействием процессов выветривания, подмыва, растворения и действия сил тяжести. Условия образования и характер развития обвально-осыпных процессов подробно описаны в научной литературе.

Целью настоящего исследования является изучение масштабов распространения, активности и опасности проявления обвально-осыпных процессов на территории Карачаево-Черкесской Республики за период 2005–2022 гг.

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

- изучение районов распространения и активности проявления обвально-осыпных процессов на территории республики за изучаемый период времени;

- анализ произошедших на территории республики наиболее значимых обвально-осыпных активизаций и оценка социально-экономических аспектов их последствий.

Материалы и методы исследований

Главным методом, используемым в данной работе, стал анализ различных источников, содержащих информацию об активности проявления обвально-осыпных процессов на территории Карачаево-Черкесской Республики за 2005–2022 г. В качестве основных были использованы литературные источники [4, 9, 14, 20] и опубликованные данные Центра государственного мониторинга состояния недр (ГМСН) ФГБУ «Гидроспецгеология» [5–8].

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 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 обваль-но-осыпных процессов на территории республики за изучаемый период времени. Необходимо отметить, что ведение государственного мониторинга состояния недр на территории Карачаево-Черкесской Республики за изучаемый период осуществлялось организациями-филиалами (ГНПП «Гидрогеоэкология», ОАО «Гидрогеоэкология») Южного регионального центра (ЮРЦ) государственного мониторинга состояния недр ФГБУ «Гидроспецгеология».

Результаты исследований и их обсуждение

Интенсивность развития обваль-но-осыпных процессов на территории Карачаево-Черкесской Республики обусловлена многими факторами, основными из которых являются геологическое строение (литологический состав пород, их тектоническая раздробленность и др.), значительная расчлененность рельефа, большая крутизна склонов, степень задернованности (зале-сенности) склонов, довольно высокая сейсмичность и особенности климатических условий. Активизация обваль-но-осыпных процессов на территории республики происходит, главным образом, в весенне-летний период и связана, как правило, с сильным увлажнением пород в периоды снеготаяния и ливневых осадков [5–8]. В летние месяцы, во время интенсивного таяния ледников, активизация обвалов и осыпей наблюдается в высокогорно-ниваль-ной зоне. Большая часть проявлений приурочена к участкам техноген-ного воздействия на геологическую среду (подрезка, проведение буровзрывных работ и др.), что приводит к нарушению устойчи-вости склонов.

Значительное распространение обваль-но-осыпные процес-сы получили на автомобильных дорогах (а/д) республики, проходя-щих вдоль долин ее основных рек. Данные [4–8] свидетельствуют о том, что ежегодно активные обваль-но-осыпные участки формиру-ются на отдельных участках автодорог Карачаевск – Учкулан, Кис-ловодск – Карачаевск, Зеленчукская – Архыз, Новая Теберда – Дом-бай, Хумара – Белая Гора и др. Так, например, на участке (протяжен-

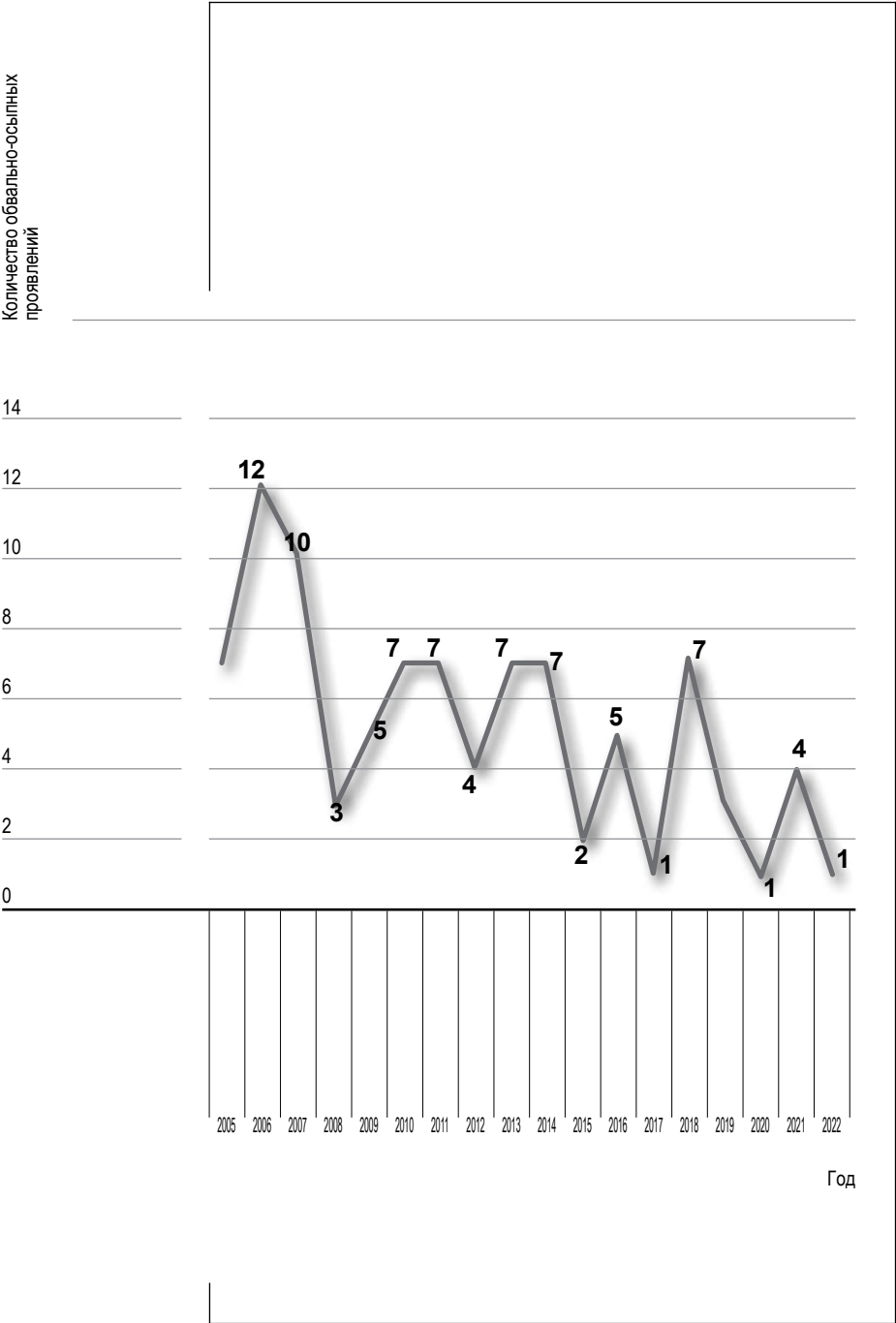


Рис. 2. Динамика обвально-осыпной активности на территории Карачаево-Черкесской Республики за период 2005–2022 гг.
Fig. 2. Dynamics of avalanche-talus activity on the territory of the Karachay-Cherkess Republic for the period 2005–2022.

ностью 28 км) а/д Карачаевск – Учкулан, от аула (а.) Каменномост до поселка (п.) Эльбрусский, по всей длине развиты активные обвально-осыпные шлейфы по обоим бортам долины р. Кубань. Высота обвально-осыпных участков здесь колеблется от 20 м до 70 м. Населенные пункты республики в гораздо меньшей степени, чем автомобильные дороги, подвержены обвально-осыпным процессам. В Зеленчукском районе обвальная опасность существует для поселка (п.) Архыз, отдельные активные обвально-осыпные участки выявлены на склонах хребта Абишир-Ахуба (от 2000 м н.у.м и выше) [20]. В Карачаевском районе обвальные процессы зафиксированы в п. Белая Гора и аулах Хумара и Джингирик) [5–8]. В зоне активизации отдельных обвально-осыпных участков находятся населенные пункты Урупского района, расположенные в долинах р. Лаба – поселки Подскальное, Пхия, Рожкао, Азиатский; с. Курджиново и р. Кубань – п. Медногорский, ст. Преградная, с. Уруп [2, 3]. Небольшие обвально-осыпные проявления отмечены в г. Карачаевск и поселках Орджоникидзевский и Маркопи Карачаевского района, а также в аулах Алибердуковский и, частично, Зеюко Хабезского района [17].

Многочисленные очаги развития обвально-осыпных процессов выявлены на участках построенных горно-лыжных трасс и канатно-кресельных дорог в горных рекреационных районах республики [9]. Следует отметить, что осыпные явления не оказывают серьезного негативного влияния на объекты рекреационной инфраструктуры, за исключением осыпей, сформировавшихся на техногенных (искусственных) карнизах.

Всего за 2005–2022 гг. на территории республики произошло более 90 значимых обвально-осыпных проявлений (рис. 2). Наибольшее их количество (более 85 %) наблюдалось на автодорогах, около 15 % активизаций было зафиксировано в населенных пунктах республики. Основными факторами активизации обвально-осыпных процессов за изучаемый период стали гидрометеорологические явления. Приведем результаты анализа активности и опасности проявления обвально-осыпных процессов на территории Карачаево-Черкесской республики за период 2005–2022 гг.

В **2005 г.** активность обвально-осыпных процессов в целом по республике была средней. В Карачаевском районе на отдельных участках а/д Карачаевск – Домбай в течение года пять раз фиксировались небольшие обвальные проявления, было выявлено два вновь образовавшихся осыпных участка.

В **2006 г.** на территории республики была зафиксирована высокая степень обвально-осыпной активности. В этот год были активными 12 обвально-осыпных участка, в том числе четыре вновь образовавшихся. В Карачаевском районе в весенне-летний период существовала угроза обвальных обрушений в п. Белая Гора. Практически круглогодичная активность обвально-осыпных процессов отмечалась и на западной окраине а. Джингирик, на крутом склоне правого борта р. Теберда. Здесь длина опасного обвально-осыпного участка составляла 70–80 м, а размер обвальных глыб достигал двух метров в диаметре. Существовала угроза обвальных обрушений на жилые дома, хозяйственные объекты аула и федеральной а/д Невинномысск – Домбай. Активные осыпи и обвалы практически весь год фиксировались на отдельных участках этой автодороги (от г. Карачаевск до п. Домбай) и на а/д Кисловодск – Карачаевск. Высокая степень активности обвально-осыпных процессов, в виде обрушений на дорогу глыб пород (диаметром до 3 м), фиксировалась на отдельных участках а/д Карачаевск – Учкулан (от а. Каменномост до п. Эльбрусского), на одном из участков произошло разрушение подпорной железобетонной стенки. В Зеленчукском районе практически круглогодичная активность обвально-осыпных процессов отмечалась в п. Архыз, а также на отдельных участках а/д Зеленчукская – Архыз.

Высокая степень активности обвально-осыпных процессов на территории республики наблюдалась и в **2007 г.** (выявлено 10 активных участков). В Зеленчукском районе низкая обвально-осыпная активность была отмечена в п. Архыз, а также на отдельных участках а/д Зеленчукская – Архыз. В Карачаевском районе довольно значительная активизация отмечалась на западной окраине а. Джингирик (на крутом склоне правого борта р. Теберда),

где длина опасного обвального участка составляла 70–80 м. Размер неустойчивых глыб пород достигал двух метров в диаметре. Существовала угроза обвальных обрушений на жилые дома, хозяйственные объекты аула и а/д Невинномысск – Домбай. Следует отметить, что активные осыпи и обвалы круглогодично фиксировались на отдельных участках этой дороги (от г. Карачаевск до п. Домбай) и на а/д Кисловодск – Карачаевск. Активные обвально-осыпные участки также круглогодично наблюдались и на отдельных участках а/д Карачаевск – Учкулан (от а. Каменномост до п. Эльбрусского).

В 2008 г. в республике фиксировалась низкая активность обвально-осыпных процессов (выявлено три значимых проявления). Отдельные активные обвальные участки наблюдались на дорогах Карачаевского района – Карачаевск – Учкулан (от а. Каменномост до п. Эльбрусского) и Кисловодск – Карачаевск. В Зеленчукском районе низкая активность изучаемых процессов была отмечена в левом борту долины р. Большой Зеленчук, на отдельных участках а/д Зеленчукская – Архыз, а повышенная активизация была зафиксирована на одном из участков а/д Исправная – Сторожевая. Суммарная протяженность участков дорог республики, подвергшихся воздействию обвально-осыпных процессов в 2008 г. достигла 19 км.

В 2009 г. на территории республики было выявлено пять проявлений обвально-осыпного процесса. Средняя степень его активности наблюдалась в Карачаевском районе на а/д Карачаевск – Учкулан (от а. Каменномостский до п. Эльбрусский), а также на а/д Невинномысск – Домбай (от а. Хумара до г. Карачаевска). В Зеленчукском районе активные обвально-осыпные процессы наблюдались на отдельных участках автодорог Зеленчукская – Архыз и Сторожевая – Исправная.

В 2010 г. на территории республики наблюдалась высокая степень активности обвально-осыпных процессов. Их проявления (11 форм) наблюдались в двух населен-



Рис. 3.

Скальный обвал на а/д Исправная – Сторожевая (в 500 м южнее ст. Исправная), Зеленчукский район, 2010 г. Фото ОАО «Гидрогеоэкология».

Fig. 3. Rock collapse on the road Serviceable – Watchtower (500 m south of the station Serviceable), Zelenchuk district, 2010 Photo of JSC "Hydrogeoecology".

ных пунктах и на автодорогах республики. В Зеленчукском районе обвально-осыпная активность была отмечена с мая по октябрь на отдельных участках автодорог Зеленчукская – Архыз и Исправная – Сторожевая. Так, 27 мая на а/д Исправная – Сторожевая, проходящей по правому берегу р. Большой Зеленчук (в 500 м южнее ст. Исправная), произошел крупный обвал коренных известняков с прослойками песчаников юрского возраста (объем – 1000–1500 м³), перекрывший 70 м дороги. Размер глыб достигал 8,0 м (рис. 3). Дальнейшее развитие процесса на данном участке могло вызвать разрыв водовода, проходящего по обочине, и обрушение до 100 м полотна дороги. Образованию такого обрушения мог способствовать размыв обрыва берега, так как почти все русло р. Б. Зеленчук примыкает к правому берегу.

В Усть-Джегутинском районе развитие обвально-осыпных процессов было отмечено с июля по октябрь на отдельных участках вдоль а/д Сары-Тюз – Каменноост. В Карачаевском районе, с марта по октябрь отмечались обвалы и осыпи на отдельных участках в а. Хумара (существовала угроза жилому сектору и автодороге). Активные осыпи и обвалы в этот период наблюдались и на отдельных участках автодорог Кисловодск – Карачаевск и Карачаевск – Учкулан (от а. Каменноост до п. Эльбрусского). В мае активизировались обвально-осыпные процессы на крутом коренном склоне (высота – более 100 м) левого борта долины р. Кубань, в северо-западной части а. Кумыш. Здесь (в верхней части склона) находятся обрывистые обнажения трещиноватых песчаников юрского возраста, которые в процессе выветривания разрушаются и периодически скатываются вниз по склону. В опасной зоне находились жилые дома, огороды и грунтовая дорога по ул. М. Батчаева.

В 2011 г. активность обвально-осыпных процессов в республике несколько снизилась (до среднего уровня) по сравнению с предыдущим годом (зафиксировано семь активных обвально-осыпных участка). В Карачаевском районе активизация наблюдалась (с апреля по октябрь) на отдельных участках автодорог Кисловодск – Карачаевск и Карачаевск – Учкулан

(на участке от а. Каменноост до п. Эльбрусского). В Зеленчукском районе активизация фиксировалась (с июля по ноябрь) на отдельных участках а/д Зеленчукская – Архыз, в левом борту долины р. Большой Зеленчук. В Усть-Джегутинском районе развитие обвально-осыпных процессов было отмечено с июля по октябрь на отдельных участках а/д Сары-Тюз – Каменноост. Общая протяженность участков дорог республики, подверженных негативно-му воздействию обвально-осыпного процесса в 2011 г. составила 25 км.

В 2012 г. фиксировалась низкая степень активности обвально-осыпных процессов (выявлено четыре активных обвально-осыпных участка), преимущественно вдоль трасс автодорог. В Карачаевском районе активизация обвально-осыпных участков отмечалось с апреля по октябрь на автодорогах Кисловодск – Карачаевск и Карачаевск – Учкулан (на участке от а. Каменноост до п. Эльбрусского). В Зеленчукском районе активизация была зафиксирована с июля по ноябрь на отдельных участках а/д Зеленчукская – Архыз (в левом борту долины р. Большой Зеленчук). В Усть-Джегутинском районе развитие обвально-осыпных процессов наблюдалось (с июля по октябрь) на отдельных участках вдоль а/д Сары-Тюз – Каменноост. Общая протяженность участков автодорог республики, подвергшихся негативному воздействию обвально-осыпных процессов в 2012 г. составила 25 км.

В 2013 г. отмечена средняя степень активности обвально-осыпных процессов (выявлено семь проявлений). В Карачаевском районе обвально-осыпная активизация отмечалась с апреля по октябрь вдоль автодорог Кисловодск – Карачаевск и Карачаевск – Учкулан (на участке от а. Каменноост до п. Эльбрусского). В северо-западной части п. Мара-Аягъы была зафиксирована активизация (с апреля по сентябрь) обвально-го участка на крутом обрывистом уступе высокой правобережной террасы р. Кубань. В потенциально обвалоопасной зоне находился участок а/д Черкесск – Домбай протяженностью 30 м, водопро-

вод, проходящий вдоль полотна дороги и территории частных домовладений поселка. В Зеленчукском районе обвально-осыпные процессы были отмечены на отдельных участках а/д Зеленчукская – Архыз (по левому борту долины р. Большой Зеленчук). Высота обвальных склонов здесь достигала 40 м, размер обвальных глыб – до 1 м в диаметре. В Усть-Джегутинском районе развитие обвально-осыпных процессов, по-прежнему, наблюдалось (с июля по октябрь) на отдельных участках а/д Сары-Тюз – Каменно-мост.

Активность обвально-осыпных процессов и количество проявлений в **2014 г.** было аналогично предыдущему году. Все выявленные активизации оказали воздействие главным образом на трассы автодорог. Основным фактором активизации явились атмосферные осадки. В Зеленчукском районе активность обвально-осыпных процессов отмечалась (с мая по август) на отдельных участках а/д Зеленчукская – Архыз (по левому борту долины р. Большой Зеленчук) и в п. Архыз. В Карачаевском районе (с мая по сентябрь) существовала угроза обвальных обрушений на жилую инфраструктуру в аулах Хумара, Кумыш и поселках Мара-Аягъы и Домбай. На а/д Карачаевск – Учкулан (от а. Каменно-мост до п. Эльбрусского) было зафиксировано три участка активизации обвально-осыпных процессов протяженностью 500–600 м (в правом и левом бортах долины р. Кубань). Развитие обвально-осыпных процессов в этот период отмечалось также и на а/д Кисловодск – Карачаевск (от а. Верхняя Мара до перевала Гумбаши).

Низкая активность обвально-осыпных процессов фиксировалась на территории республики в **2015 г.**, было выявлено всего два значимых проявления, вызванных, в основном, выпадением атмосферных осадков в апреле-октябре. В Карачаевском районе незначительная обвально-осыпная активизация наблюдалась на отдельных участках автодорог Карачаевск – Учкулан и Кисловодск – Карачаевск. В зоне воздействия обвального процесса в этом году находились северо-западная часть а. Кумыш (рис. 4) и а. Хумара.



Рис. 4.

Участок активного развития обвально-осыпных процессов на северо-западной окраине а. Кумыш Карачаевского района, 2015 г. Фото ТЦ ГМСН по Карачаево-Черкесской Республике.

Fig. 4. The area of active development of avalanche-talus processes on the north-western outskirts of the village of Kumysh, Karachay district, 2015. Photo of the GMSN shopping center in the Karachay-Cherkess Republic.

В **2016 г.**, на фоне в целом средней обвально-осыпной активизации, на территории республики было зафиксировано пять активных обвальных участка, приуроченных к верховым откосам автодорог. Основным фактором активизации явились атмосферные осадки. В Карачаевском районе на а/д Черкесск – Домбай (между а. Новая Теберда и п. Домбай) было зафиксировано два активных обвально-осыпных участка, приуроченных к верховым откосам дороги. В пределах этих участков отмечено разрушение 150 м защитных сооружений (удерживающие сетки и подпорные стены, выполненные из габионов). Развитие обвально-осыпных процессов было зафиксировано и в верховом откосе (высотой до 30 м) а/д Кисловодск – Карачаевск на участке длиной 225 м. Глыбы, размером до 1,5 м в поперечнике, периодически скатывались к полотну дороги. Активный обвально-осыпной участок (шириной около 10 м) был отмечен и в верховом откосе а/д Сары-Тюз – Каменноостский (Усть-Джегутинский район). Обвально-осыпными массами здесь было перекрыто 50 м полотна дороги.

В **2017 г.** активность обвально-осыпных процессов в целом по республике оценивалась как очень низкая. В Карачаевском районе выявлено одно активное проявление (обусловленное выпадением атмосферных осадков), которое было приурочено к верховому откосу а/д Черкесск – Домбай (к северу от п. Домбай). Обвально-осыпными массами было засыпано 75 м дороги и заполнен придорожный водоотводный бетонный лоток.

Среднемноголетний уровень обвально-осыпной активности наблюдался в республике в **2018 г.** (выявлено семь проявлений). Все выявленные активизации были приурочены к верховым откосам автодорог Карачаевского района (Карачаевск – Учкулан, Хумара – Белая Гора и Новая Теберда – Домбай). На а/д Карачаевск – Учкулан было выявлено четыре обвальных проявления (с низкой активностью), приуроченных к выходам делювиальных щебнисто-глыбовых отложений и выветрелых песчано-глинистых пород юрского возраста. Протяженность обвально-осыпных

склонов здесь составила от 35 до 120 м. На первом участке (пикет 37,1 км), в подрезанном верховом откосе дороги (высота – до 6 м, крутизна – до 80°) были отмечены небольшие вывалы пород, представленных делювиальными суглинками с обильным включением обломков песчаников, на обочину дороги протяженностью 50 м. На втором участке (пикет 30,1 км), в подрезанном верховом откосе дороги (высота – до 20 м, крутизна – до 65°) были отмечены небольшие вывалы аллювиальных отложений (левобережной цокольной террасы р. Кубань) на ее обочину на участке длиной 40 м. На пикете 20,3 км, в правом берегу р. Кубань, выявлены небольшие вывалы скальных обломков и глыб ($3 \times 2 \times 1,5 \text{ м}^3$) на обочину дороги протяженностью 35 м. На пикете 16,4 км, в месте выхода скальных пород высотой до 15 м (также на правом берегу р. Кубань), наблюдались их вывалы на обочину дороги протяженностью 120 м. Севернее а. Хумара, в верховом откосе а/д Хумара – Белая Гора (правый берег р. Кубань), наблюдались вывалы на ее обочину скальных обломков (ширина – 3 м, длина – 7 м, высота – 0,4 м) нижнеюрских песчаников с прослоями глин. На правом берегу р. Теберда, в верховом откосе а/д Новая Теберда – Домбай (пикеты 49,5 и 40,4 км), было выявлено два обвальных участка протяженностью 9 и 10 м, которые характеризовались низкой активностью. Здесь наблюдались небольшие вывалы обломков и глыб пород на обочину дороги, обвально-осыпными массами были заполнены улавливающие «пазухи» оградительных стенок. Обвальные отложения были представлены делювиальными суглинками с обильным включением обломков и глыб скальных пород. Основными факторами активизации обвально-осыпных процессов явились атмосферные осадки и техногенный фактор.

Низкая степень активизации обвально-осыпных процессов на территории республики наблюдалась в 2019 г. Весной было зафиксировано три активных обвально-осыпных участка в Карачаевском районе. Так, в марте, на а/д Карачаевск – Учкулан (пикет 25,6 км), на правом берегу р. Кубань, были зафиксированы небольшие вывалы скальных обломков и глыб (до $1,5 \times 1,5 \times 1,5 \text{ м}$) на обочину дороги. Протяженность обвального

склона (высотой до 5 м) составила 65 м. В апреле на правом берегу р. Теберда в верховом откосе а/д Новая Теберда – Домбай (пикеты 49,3 км и 40,4 км), было зафиксировано два обвально-осыпных участка, характеризовавшихся низкой активностью. Обвальными отложениями, представленными делювиальными суглинками с обильным включением щебня и глыб скальных пород, были заполнены улавливающие «пазухи» подпорных стенок, отдельные обломки находились на обочине дороги.

В 2020 г. обвально-осыпная активность на территории республики была очень низкой. В Карачаевском районе на а/д Карачаевск – Учкулан (пикет 29,57 км), был зафиксирован вывал (объем – до 10 м^3) глыб скальных пород с верхового откоса на обочину дороги (ширина проявления составила 8 м, длина – 4 м). Основным фактором активизации явились атмосферные осадки.

В 2021 г. активность обвально-осыпных процессов на территории республики была низкой. Весной на дорогах Зеленчукского и Карачаевского районов было зафиксировано четыре активных обвально-осыпных участка, обрушение которых не привело к значительному ущербу. В Зеленчукском районе на а/д Зеленчукская – Архыз отмечалась низкая активность обвально-осыпного процесса на скальном выходе (протяженность обвального участка – 60 м, высота – до 12 м) в подножье левого берега р. Большой Зеленчук. Скальный выход был представлен выветрелыми песчаниками юры с различными системами трещиноватости, с шириной раскрытия трещин от 0,5 до 5 см. Активизация в привершинной части склона привела к осыпанию и обрушению обломков пород и щебня (площадь – 45 м^2 , мощность – 0,3 м, объем – до 10 м^3) к подножию склона и на полотно дороги.

В Карачаевском районе активизировались три обвально-осыпных участка, из них два на а/д Новая Теберда – Домбай (правый берег р. Теберда) и один – на а/д Карачаевск – Учкулан (пикет 19,5 км). На а/д Новая Теберда – Домбай обвально-осыпными массами, представленными делювиальными суглинками с обильным включением щебня и глыб скальных пород, были заполнены «пазухи» подпор-

ной стенки, отдельные обломки скальных пород попали на обочину дороги. Площадь отложений на первом обвальном участке дороги (высота склона – до 5 м, протяженность – 25 м) составила 14 м². Смещение обломков и глыб пород к подножию склона достигало 5 м, объем – до 4 м³. На втором участке (высота склона – до 8 м, протяженность – 65 м) площадь обвальных отложений составила 8 м². Смещение обломков и глыб пород к подножию склона достигало 6 м, объем – до 2 м³. На а/д Карачаевск – Учкулан (пикет 19,5 км) в обвально-осыпной процесс (смещение – 5 м) были вовлечены аллювиальные валунно-галечниковые отложения (ширина – 6 м, длина – 2 м, объем – до 1 м³), перекрытые склоновыми суглинками с обильным включением обломков песчаника.

Очень низкая степень активности обвально-осыпных процессов на территории республики наблюдалась в **2022 г.** В Карачаевском районе в верховом откосе а/д Кисловодск – Карачаевск (пикет 76 км) в весенний период произошел обвал горных пород (площадь – 6 090 м², объем – 1 000 м³, мощность – до 2 м), сложенных нижнеюрскими песчаниками. Вывал обломков и глыб пришелся на нижнюю часть склона, в 120 м от полотна дороги.

Анализ приведенного материала показывает, что многие участки автодорог республики нуждаются в защите от обвально-осыпных процессов. Работы по устройству защитных сооружений от склоновых гравитационных процессов ведутся в республике уже много лет. Так, в 2018 г. при реконструкции автомобильной дороги (протяженностью 7,5 км) к туристическому комплексу «Медовые водопады», расположенном в долине рек Аlikоновка и Эчки-Баш на территории Малокарачаевского района, была обустроена защитная система, предохраняющая дорогу от камнепадов и обвалов. При ремонте 12 километров участка автодороги А-156 (пикет 63–75 км), ведущей от Военно-Сухумской дороги (трасса А-155) до международного центра отдыха «Архыз» и астрофизической обсерватории Российской академии наук, к 2020 г. было построено более 1 км улавливающих железобетонных стен и отремонтировано около 450 м подпорных стен для защиты от обвалов и камнепадов.

Выводы

Проведенные систематизация и анализ различных источников, содержащих информацию об активизации обвально-осыпных процессов на территории Карачаево-Черкесской Республики, позволили охарактеризовать условия и причины, а также оценить активность и опасность обвально-осыпных деятельности в административных районах республики за 2005–2022 гг. Определена роль природного и техногенного факторов в развитии данного процесса. Максимальное число случаев обвально-осыпной активизации на территории республики приурочено к весенне-летнему периоду и, в основном, обусловлено снеготаянием и обильными атмосферными осадками. За изучаемый период времени на территории республики зафиксировано более 90 значимых обвально-осыпных проявлений, объемы которых не превышали 1000–1500 м³. Большинство активных обвально-осыпных участков (более 85 %) было зафиксировано на автомобильных дорогах республики. Наибольшая степень их активизации отмечалась в Карачаевском и Зеленчукском административных районах республики. Анализ обвально-осыпной активности за изучаемый период показал, что в пределах территории субъекта она различается по годам. Высокий ее уровень отмечался в 2006, 2007 и 2010 гг., а очень слабая степень активизации наблюдалась в 2017, 2020 и 2022 гг. В статье приведены сведения о местоположении обвально-осыпных проявлений и их характеристиках, масштабах разрушений и деформаций, вызванных ими. Выявленные обвально-осыпные активизации, наблюдавшиеся в населенных пунктах и на хозяйственных объектах республики, а также анализ социально-экономических аспектов их последствий позволяют говорить о невысокой степени опасности обвально-осыпной деятельности в Карачаево-Черкесской Республике.

Библиографический список

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. Гедуева М.М., Джаппуев Д.Р. Результаты обследования бассейна р. Лаба в 2019 г. на предмет наличия опасных природных процессов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2020. № 3 (95). С. 58–63.
3. Джуртубаева Ф.Х. Изучение причин возникновения чрезвычайных ситуаций на территории Карачаево-Черкесской Республики // Проблемы современного педагогического образования. 2019. № 65 (2). С. 111–114.
4. Доклады «О состоянии защиты населения и территорий Карачаево-Черкесской Республики от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера за 2004–2021 годы» / Главное управление МЧС России по Карачаево-Черкесской Республике. Черкесск, 2005–2022.
5. Информационные бюллетени о состоянии недр на территории Российской Федерации в 2004–2021 гг. М.: Геоинформмарк, 2005–2022. Вып. 28–45.
6. Информационные бюллетени о состоянии недр территории Северо-Кавказского федерального округа Российской Федерации за 2015–2021 гг. Ессентуки: Гидроспецгеология, 2016–2022. Вып. 12–18.
7. Информационные сводки о проявлениях экзогенных геологических процессов на территории Российской Федерации (по кварталам) за 2007–2022 гг. М.: Гидроспецгеология, 2007–2022.
8. Информационные сводки о проявлениях экзогенных геологических процессов на территории Северо-Кавказского федерального округа (по кварталам) за 2006–2022 гг. Ессентуки: Гидроспецгеология, 2006–2022.
9. Караваяев В.А. Влияние горно-лыжных трасс на обвальнo-осыпные процессы на Домбае // Жизнь Земли. 2019. № 41 (1). С. 15–19.
10. 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.
11. Коломенский Н.В. Специальная инженерная геология. М.: Недра. 1969. 335 с.
12. Крохмаль А.Г. Карачаево-Черкесия: Эколого-географические проблемы. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовского государственного университета, 1999. 200 с.

13. Потапенко Ю.Я. Геология Карачаево-Черкесии: учебное пособие. Карачаевск, 2004. 154 с.
14. Разумов В.В., Аджиев А.Х., Разумова Н.В., Глушко А.Я., Шагин С.И., Кондратьева Н.В., Притворов А.П., Колычев А.Г., Шаповалов М.А. Опасные природные процессы Северного Кавказа / под ред. В.В. Разумова. М.: Феория, 2013. 320 с.
15. 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.
16. Сафронов И.Н. Геоморфология Северного Кавказа. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 1969. 221 с.
17. Схема территориального планирования Карачаево-Черкесской Республики. Т. II. Современное положение. Кн. 1. Ростов-на-Дону: Научно-проектная организация «Южный градостроительный центр», 2008. 197 с.
18. Четырехязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии / под ред. А.И. Спиридонова. М.: Советская энциклопедия, 1980. 703 с.
19. Шальнев В.А., Юрин Д.В. Древние оледенения и палеогляциальный рельеф Архыза // Наука. Инновации. Технологии. 2015. № 1. С. 127–136.
20. Шуляков Д.Ю., Николайчук А.В. Экзогенные процессы в районе «Лунной поляны» (п. Архыз, Западный Кавказ) // Географические исследования Краснодарского края: сб. статей / под ред. А.В. Погорелова. Краснодар: Кубанский государственный университет физической культуры, спорта и туризма, 2009. С. 67–71.

References

1. Abaykhaiova A.A., Shkarlet K.Yu., Kharin K.V. The current state of valley landscapes of the Karachay-Cherkess Republic. Natural and Technical Sciences. 2011. No. 6 (56). P. 314–317. (In Russ.).
2. Gedueva M.M., Dzhappuev D.R. The results of the survey of the Laba river basin in 2019 for the presence of hazardous natural processes. Izvestiya Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2020. No. 3 (95). P. 58–63. (In Russ.).
3. Dzhurtubayeva F.H. Study of the causes of emergency situ-

ations on the territory of the Karachay-Cherkess Republic. Problems of modern pedagogical education. 2019. No. 65 (2). P. 111–114. (In Russ.).

4. Reports «On the state of protection of the population and territories of the Karachay-Cherkess Republic from natural and man-made emergencies for 2004–2021». The Main Directorate of the EMERCOM of Russia for the Karachay-Cherkess Republic. Cherkessk, 2005–2022. (In Russ.).
5. Newsletters on the state of the subsoil on the territory of the Russian Federation in 2004–2021. M.: Geoinformmark, 2005–2022. Issue 28–45. (In Russ.).
6. Newsletters on the state of the subsoil of the territory of the North Caucasus Federal District of the Russian Federation for 2015–2021. Essentuki: YURTS GMSN FGBI «Hydrospetsgeology», 2016–2022. Issue 12–18. (In Russ.).
7. Information reports on the manifestations of exogenous geological processes on the territory of the Russian Federation (by quarters) for 2007–2022. Moscow: Federal State Budgetary Institution «Hydrospetsgeology», 2007–2022. (In Russ.).
8. Information reports on the manifestations of exogenous geological processes on the territory of the North Caucasus Federal District (by quarters) for 2006–2022. Essentuki: YURTS GMSN FGBI «Hydrospetsgeology», 2006–2022. (In Russ.).
9. Karavaev V.A. The influence of mountain-ski trails on avalanche-talus processes on Dombai. Life of the Earth. 2019. No. 41 (1). P. 15–19. (In Russ.).
10. Kipkeeva P.A., Potapenko Yu.Ya., Kurumbayev I.R. Results of geoeological survey of the Teberda river valley. Landscape and recreational potential of Karachay-Cherkessia. Materials of the XII scientific and practical conference. Karachaevsk: KCHGU, 2015. P. 25–28. (In Russ.).
11. Kolomenskiy N.V. Special engineering geology. M.: Nedra, 1969. 335 p. (In Russ.).
12. Krokhmal A.G. Karachay-Cherkessia: Ecological and geographical problems. Rostov-on-Don: Rostov State University Publishing House, 1999. 200 p. (In Russ.).
13. Potapenko Yu.Ya. Geology of Karachay-Cherkessia. Study guide. Karachaevsk, 2004. 154 p. (In Russ.).
14. Razumov V.V., Adzhiev A.H., Razumova N.V., Glushko A.Ya., Shagin S.I., Kondratieva N.V., Pritvorov A.P., Kolychev A.G., Shapovalov M.A. Dangerous natural processes in the North

- Caucasus /edited by V.V. Razumov. Moscow: Feoria, 2013. 320 p. (In Russ.).
15. Razumov V.V., Bogdanova N.D., Viskhadzhieva K.S., Razumova N.V. The extent of the spread and activity of the manifestation of landslide processes in the Karachay-Cherkess Republic. Georisk. 2020. Volume XIV. No. 2. P. 78–87. (In Russ.).
 16. Safronov I.N. Geomorphology of the North Caucasus. Rostov-on-Don: Publishing house of the Russian State University. 1969. 221 p. (In Russ.).
 17. The scheme of territorial planning of the Karachay-Cherkess Republic. Volume II. The current situation. Book 1. Rostov-on-Don: LLC «Scientific and design organization «Southern Urban Development Center», 2008. 197 p. (In Russ.).
 18. Quadrilingual encyclopedic dictionary of terms on physical geography / edited by A.I. Spiridonov. M.: Soviet Encyclopedia, 1980. 703 p. (In Russ.).
 19. Shalnev V.A., Yurin D.V. Ancient glaciations and paleoglacial relief of Arkhyz. Science. Innovation. Technologies. 2015. No. 1. P. 127–136. (In Russ.).
 20. Shulyakov D.Yu., Nikolaychuk A.V. Exogenous processes in the area of «Lunnaya Polyana» (Arkhyz settlement, Western Caucasus). Collection of articles: Geographical studies of the Krasnodar Territory / edited by A.V. Pogorelov. Krasnodar: Kuban State University of Physical Culture, Sports and Tourism, 2009. P. 67–71. (In Russ.).

**Статья поступила в редакцию 06.04.2023,
статья одобрена после рецензирования 25.07.2023,
статья принята к публикации 30.08.2023.**

**The article was submitted to the editorial office 06.04.2023,
the article was approved after reviewing 25.07.2023,
the article was accepted for publication 30.08.2023.**

Информация об авторах

- Разумов Виктор Владимирович**, доктор географических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» Росгидромета.
E-mail: razumov_vv@mail.ru
- Федченко Людмила Михайловна**, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник, ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» Росгидромета.
E-mail: fedchenkolm@mail.ru
- Разумова Наталья Викторовна**, кандидат географических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, АО «Российские космические системы» Роскосмоса.
E-mail: razumova-nv@yandex.ru
- Богданова Наталья Дмитриевна**, инженер, Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве.
E-mail: kolesova@igiis.ru
- Шальнев Виктор Александрович**, доктор географических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры физической географии и кадастров Северо-Кавказского федерального университета. E-mail: v470524@yandex.ru

Information about the authors

- Viktor V. Razumov**, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Leading Researcher of the High-Mountain Geophysical Institute of Roshydromet. E-mail: razumov_vv@mail.ru
- Lyudmila M. Fedchenko**, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Chief Researcher of the High-Mountain Geophysical Institute of Roshydromet.
E-mail: fedchenkolm@mail.ru
- Natalia V. Razumova**, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of Russian Space Systems of Roscosmos.
E-mail: razumova-nv@yandex.ru
- Natalia D. Bogdanova**, Engineer of Institute of Geotechnics and Engineering Surveys in Construction.
E-mail: kolesova@igiis.ru
- Viktor A. Shalnev**, Doctor of Geographical Sciences, Professor, Leading Researcher at the Department of Physical Geography and Cadastre of the North Caucasus Federal University.
Email: v470524@yandex.ru

2.8.4.
УДК 622.279.51
DOI:

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ
И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
10.37493/2308-4758.2023.3.6

Курин К.К.,
Загородских И.А.

Газпром ВНИИГАЗ,
г. Тюмень, Россия

ОПЫТ АДАПТАЦИИ МНОГОПЛАСТОВОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НЫДИНСКОГО УЧАСТКА МЕДВЕЖЬЕГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Введение.

Адаптация многопластовой модели, в которой несколько пластов объединены в один объект и разрабатываются единой сеткой скважин, осложнена взаимным влиянием параметров (поровый объем, объем и интенсивность аквифера, проницаемость, продуктивность) на пластовое давление, распределение добычи с эксплуатируемых пластов, продвижение фронта пластовой воды. Корректировка любого из настраиваемых параметров одного пласта влечет за собой изменение контролируемых параметров всех связанных пластов.

Материалы и методы исследований.

Модель нижнемеловых газоконденсатных залежей Ныдинского участка Медвежьего месторождения – многопластовая. Объекты разработки состоят из 3-4 пластов. Каждый объект разрабатывается самостоятельной сеткой скважин. Каждая залежь является пластово-сводовой, обводнение происходит в латеральном направлении. Проведен анализ методом P/z , по результатам которого наблюдается действие водонапорного режима на 2 и 4 объекте разработки, что необходимо воспроизвести в модели. Также по данному методу можно косвенно судить о количестве дренируемых запасов.

Результаты исследований и их обсуждение.

Настраиваемыми параметрами при адаптации выступают: пластовое давление, фронт продвижения пластовой воды, профили добычи газа по каждой скважине. Настройка начального профиля притока воспроизводится по результатам первичного ГИС. Соответствие профилей притока дальнейших ГИС должно обеспечиваться правильным распределением начальных запасов газа по пластам внутри эксплуатационного объекта. Далее, сохраняя баланс профиля притока, производится настройка пластового давления и фронта продвижения воды посредством итерационного изменения объема и интенсивности аквифера и порового объема.

Выводы.

Алгоритм адаптации многопластовой модели, в которой несколько пластов разрабатываются единой сеткой скважин, должен начинаться с адаптации профиля притока на начальную дату. Дальнейшее перераспределение профиля добычи должно происходить итерационно за счет баланса запасов залежей, объема и интенсивности водоносного горизонта, учитывая при этом фронт продвижения пластовых вод по результатам наблюдений на фонде скважин. Настройка профиля притока за счет изменения kh не рекомендуется, так как изменение профиля притока с течением времени чаще всего не является функцией от kh . При этом следует учитывать взаимовлияние вышеуказанных параметров одного пласта на все остальные пласты внутри эксплуатационного объекта.

Ключевые слова:

адаптация гидродинамической модели, многопластовый объект, единая сетка скважин, пластовое давление, аквифер, профиль притока

Kurin K.K.,
Zagorodskih I.A.

Gazprom VNIIGAZ,
Tyumen, Russia

An Experiment in History Matching of the Multi-Reservoir Hydrodynamic Model of the Nydinsky Section of the Medvezhye Field

Introduction.

History matching of a multi-layer model, where several layers are combined into one object and developed using a unified well grid, is complicated by the mutual influence of parameters (porosity, aquifer volume and intensity, permeability, productivity) on reservoir pressure, balance of production from the producing layers, and advancement of the water front. A change in any of the adjustable parameters of one layer entails a change in the controlled parameters of all interconnected layers.

Materials and research methods.

The model of the Lower Cretaceous gas condensate deposits of the Nydinsky section of the Medvezhye deposit is a multi-layer one. The development objects consist of 3-4 layers. Each object is developed by an independent grid of wells. Each deposit is layer-uplifted, flooding occurs in the lateral direction. The analysis by the P/z method was carried out, according to the results of which the effect of the water pressure regime on the 2nd and 4th development site is observed, which must be reproduced in the model. Also, this method can indirectly indicate the amount of drained reserves.

Research results and their discussion.

The configurable parameters for history matching are: reservoir pressure, the front of the reservoir water advance, gas production profiles for each well based on the PGI using a flow meter.

The setting of the initial inflow profile is reproduced based on the results of the primary GIS. The correspondence of the inflow profiles of further GIS should be ensured by the correct distribution of the initial gas reserves across the layers inside the operational facility. Further, while maintaining the balance of the inflow profile, the formation pressure and the water advance front are adjusted by iteratively changing the volume and intensity of the aquifer and the pore volume.

Conclusions.

The algorithm for history matching of a multi-layer model, in which several layers are developed by a single grid of wells, should begin with adapting the inflow profile to the initial date. Further redistribution of the production profile should occur iteratively due to the balance of reserves of deposits, volume and intensity of the aquifer, while taking into account the front of the advance of reservoir waters based on the results of observations on the well stock. Adjusting the inflow profile by changing kh is not recommended, since changing the inflow profile over time is most often not the function of kh . At the same time, it is necessary to take into account the mutual influence of the above parameters of one formation on all other layers inside the operational facility.

Keywords:

history matching of reservoir simulation, multi-layer object, unified grid of wells, reservoir pressure, aquifer, inflow profile

Введение

С развитием программного обеспечения и мощностей вычислительной техники гидродинамическое моделирование приобретает все более важное значение в разработке месторождений. Наиболее трудоемким этапом является адаптация модели на исторические данные. Настроенная с достаточной степенью точности на историю разработки гидродинамическая модель служит надежным инструментом для расчета прогнозных показателей разработки месторождения.

Настройка (адаптация) многопластовой модели, в которой несколько пластов объединены в один объект и разрабатываются единой сеткой скважин, осложнена взаимным влиянием параметров (поровый объем, объем и интенсивность аквифера, проницаемость, продуктивность) на пластовое давление, распределение добычи с эксплуатируемых пластов, продвижение фронта пластовой воды. Корректировка любого из настраиваемых параметров одного пласта влечет за собой изменение контролируемых параметров всех связанных пластов. Это связано как с перераспределением добычи с пластов, так и с изменением режимов работы залежей.

Материалы и методы исследований

На рисунке 1 представлена модель нижнемеловых газоконденсатных залежей Ныдинского участка Медвежьего месторождения, которая является многопластовой. Объекты разработки состоят из 3–4 пластов. Каждый объект разрабатывается самостоятельной сеткой скважин. Каждая залежь является пластово-сводовой, обводнение происходит в латеральном направлении.

Принцип материального баланса и моделирование необходимо рассматривать как два дополняющих друг друга способа описания поведения месторождений. Первый метод подходит для воспроизведения истории поведения пласта, что позволяет строить и адаптировать численную модель «к прошлому» и затем проводить расчеты «в будущее» с целью дальнейшего прогнозирования явлений, протекающих в пласте [1–6].

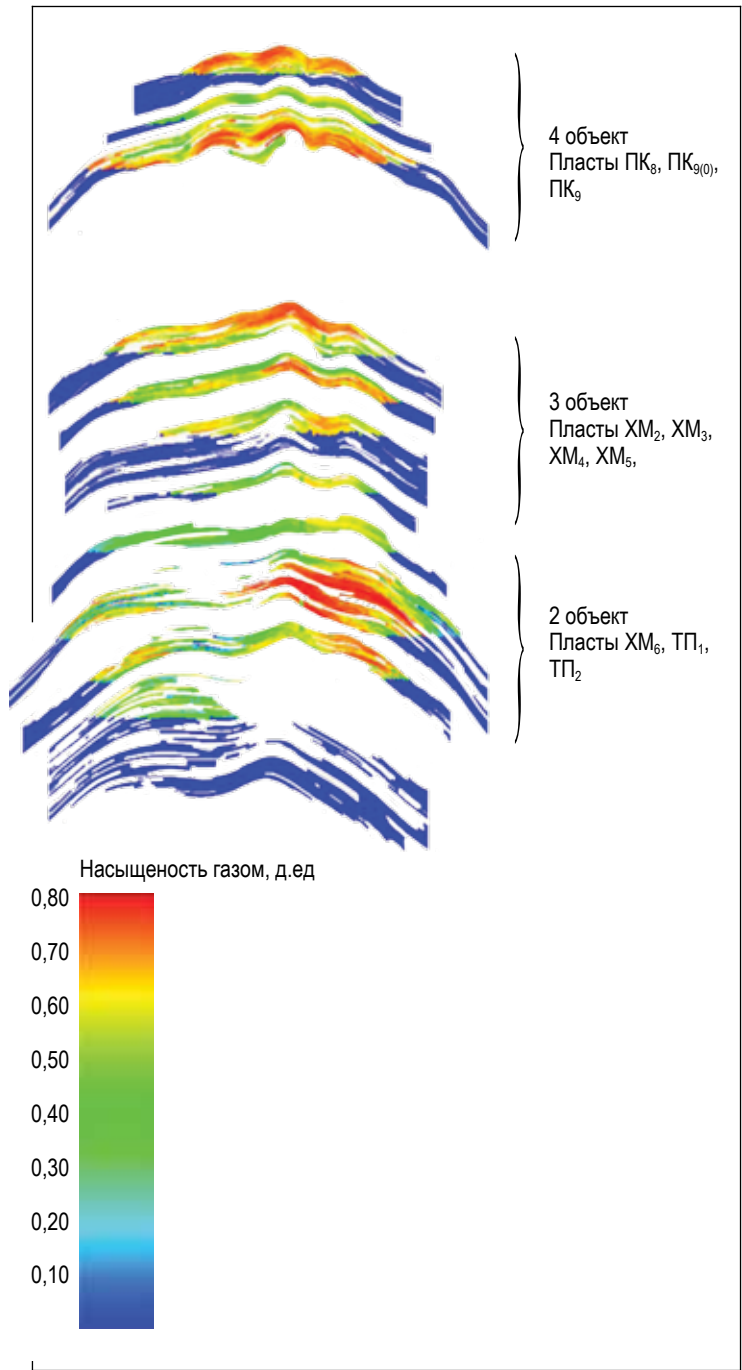


Рис. 1. Разрез куба газонасыщенности с севера на юг на начальное состояние модели.

Fig. 1. Section of the gas saturation cube from north to south on the initial state of the reservoir simulation.

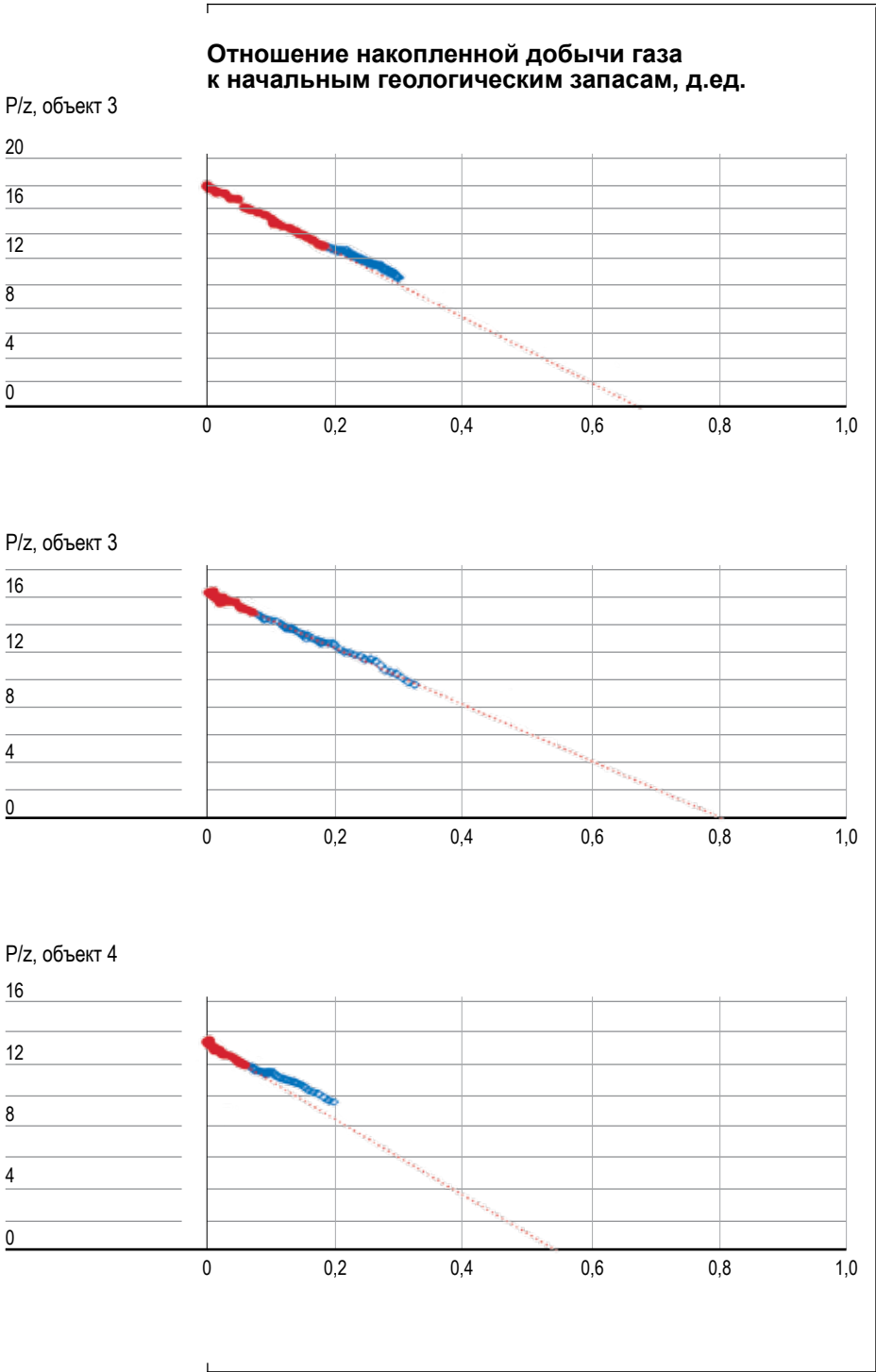


Рис. 2.

Графики метода Р/z для объектов разработки.
Fig. 2. Graphs of the P/z method for development objects.

На рисунке 2 представлены графики метода P/z , построенные по фактическим данным. По результатам анализа графиков наблюдается действие водонапорного режима на 2 и 4 объекте разработки, что необходимо воспроизвести в модели, а именно продвижение пластовых вод к галерее эксплуатационных скважин. Также по данному методу можно косвенно судить о количестве дренируемых запасов [8].

На рисунке 3 представлены значения замеренного пластового давления скважин 4 ЭО. При замере пластового давления на скважине, работающей на многопластовый объект, определяется значение, на которое оказывают влияние все перфорированные пласты. Пластовое давление каждой залежи может отличаться в большую или меньшую сторону от этого значения. Если на данном объекте есть скважины, на которых были ВИР, и теперь они работают только на один пласт, то такие скважины могут являться «маркерами» пластового давления данной залежи [7].

На 4 объекте такими скважинами являются 10403, 10405, 10406 – работающие после ВИР только на пласт $ПК_9$. Данные скважины имеют самое низкое значение замеренного пластового давления, что свидетельствует о том, что на пласте $ПК_9$ самое низкое пластовое давление на 4 ЭО.

На скважинах 10407 и 10408 основным работающим пластом, согласно ПГИ с использованием расходомера, на начальный период разработки был пласт $ПК_9$. В процессе разработки объекта профиль притока поменялся так, что основным работающим пластом данных скважин стал $ПК_8$. Данные скважины имеют самое высокое значение замеренного пластового давления, что свидетельствует о том, что на пласте $ПК_8$ самое высокое пластовое давление на 4 ЭО. Кроме того, по результатам ГИС пласт $ПК_8$ полностью обводнился в зоне многих скважин. В совокупности с информацией о пластовом давлении, можно сделать вывод о высокой интенсивности действия законтурного водоносного горизонта на пласте $ПК_8$, а также о скором полном обводнении данного пласта.

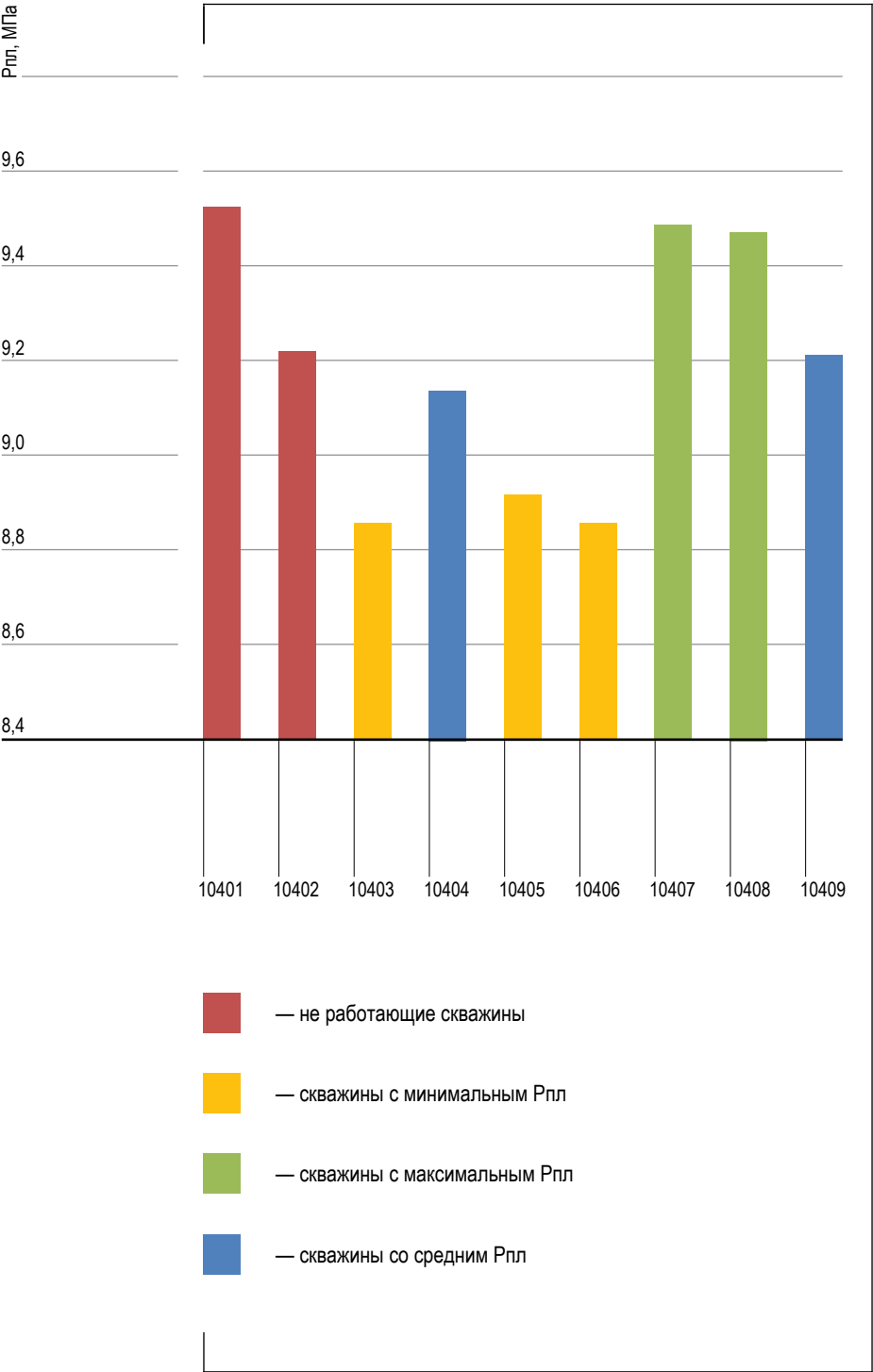


Рис. 3.

Фактическое пластовое давление скважин 4 ЭО.

Fig. 3. Actual reservoir pressure of wells 4 EO.

Результаты исследований и их обсуждение

Настраиваемыми параметрами при адаптации выступают: пластовое давление, фронт продвижения пластовой воды, профили добычи газа по каждой скважине на основании ПГИ с использованием расходомера.

Настройка начального профиля притока воспроизводится по результатам первичного ГИС. Методом настройки первичных ГИС выступает баланс kh по пластам, т.к. различие в начальных геологических запасах газа не оказывает существенного влияния на начальных этапах разработки многопластового объекта. Исключением может выступать изменение продуктивности интервалов с целью воспроизведения в модели различных ГТМ и эффектов внутри ствола скважины (например, снижение продуктивности нижних интервалов пластов вследствие накопления жидкости на забое). Соответствие профилей притока дальнейших ГИС должно обеспечиваться не изменяемым с течением времени kh , а правильным распределением начальных запасов газа по пластам внутри эксплуатационного объекта. Далее, сохраняя баланс профиля притока, производится настройка пластового давления и фронта продвижения воды посредством итерационного изменения объема и интенсивности аквифера и порового объема. Алгоритм адаптации многопластовой модели представлен на рисунке 4.

Для наглядности ниже приведены примеры отклика контролируемых параметров на изменение настраиваемых параметров.

Были рассчитаны 7 вариантов:

1. Настроенный на историю разработки
2. Увеличена продуктивность пласта $ПК_8$ в 2 раза по сравнению с 1 вариантом
3. Уменьшена продуктивность пласта $ПК_8$ в 2 раза по сравнению с 1 вариантом
4. Увеличен поровый объем пласта $ПК_8$ на 10% по сравнению с 1 вариантом
5. Уменьшен поровый объем пласта $ПК_8$ на 10% по сравнению с 1 вариантом

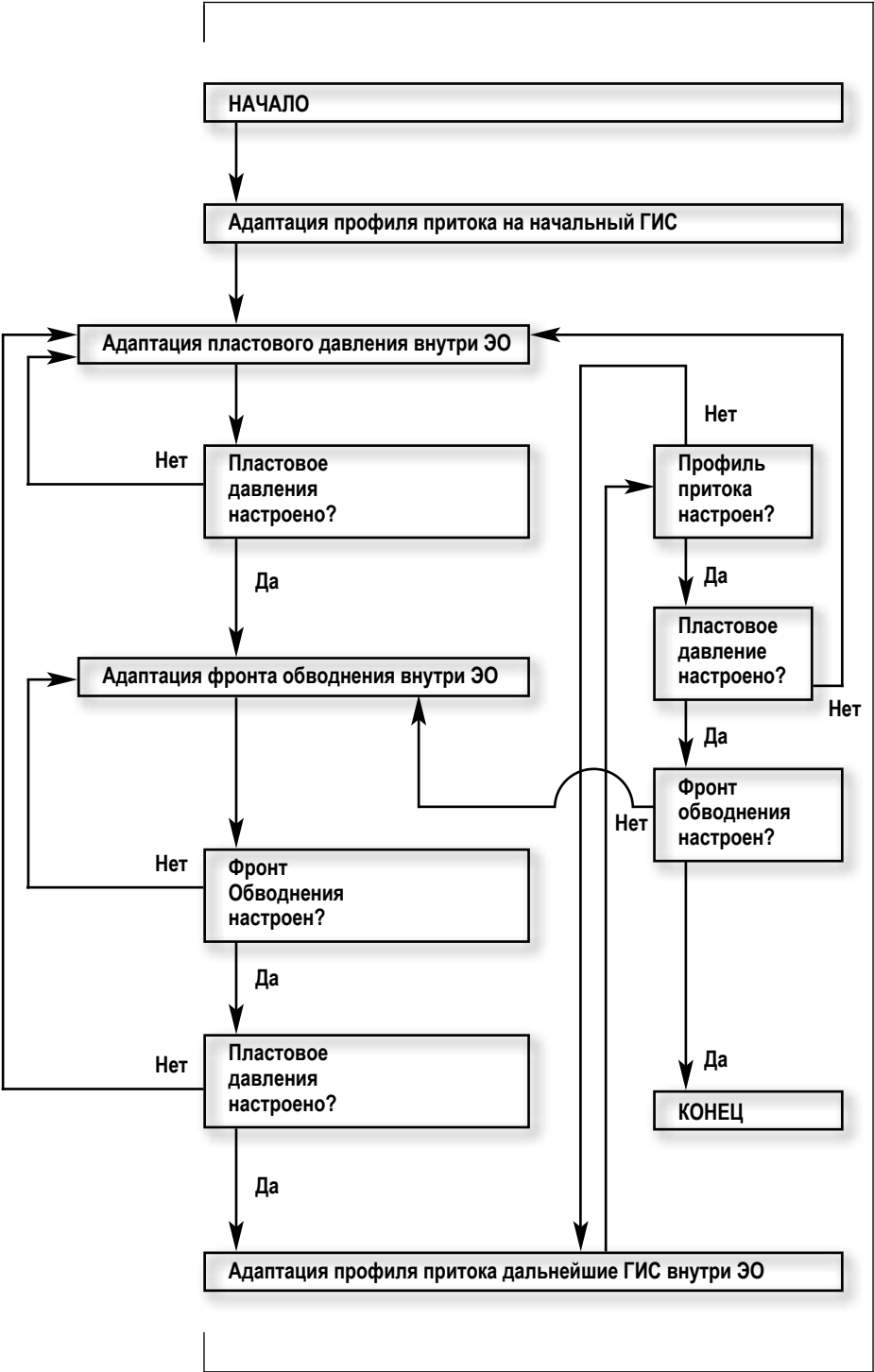


Рис. 4.

Алгоритм адаптации многопластовой модели.
Fig. 4. Multi-layer reservoir simulation history matching algorithm.

6. Увеличен объем аквифера пласта ПК₈ в 10 раз по сравнению с 1 вариантом
7. Уменьшен объем аквифера пласта ПК₈ в 10 раз по сравнению с 1 вариантом

Увеличение продуктивности пласта ПК₈ приводит к увеличению отборов данной скважины с этого пласта (рис. 6 б), и, как следствие, более быстрому падению пластового давления (рис. 5) в залежи и продвижению фронта воды (рис. 7 б). Уменьшение продуктивности приводит к противоположным явлениям.

Уменьшение порового объема пласта ПК₈ приводит к ускорению темпа снижения давления в этом пласте (рис. 8) и доли добычи с этого пласта (рис. 9 б), а также более быстрому продвижению фронта воды (рис. 10 б). Увеличение порового объема приводит к противоположным явлениям.

Уменьшение объема аквифера пласта ПК₈ приводит к ускорению темпа снижения давления в этом пласте (рисунок 11) и доли добычи с этого пласта (рисунок 12 б), а также к замедлению темпа продвижения фронта воды (рисунок 13 б). Увеличение объема аквифера приводит к противоположным явлениям.

Результаты расчетов показывают, что увеличение объема аквифера в 10 раз приводит к повышению пластового давления на 0,8 %. Столь низкое повышение величины Рпл позволяет определить, что в настроенном варианте, относительно которого производилось варьирование, уже задан высокопродуктивный водоносный горизонт на пласте ПК₈, что не противоречит методу матбаланса P/z (рис. 2). Уменьшение объема аквифера в 10 раз приводит к снижению пластового давления на 13 % и снижению динамики внедрения в залежь законтурной воды, что приводит к смене режима работы залежи с упруго-водонапорного на газовый, что противоречит методу матбаланса P/z.

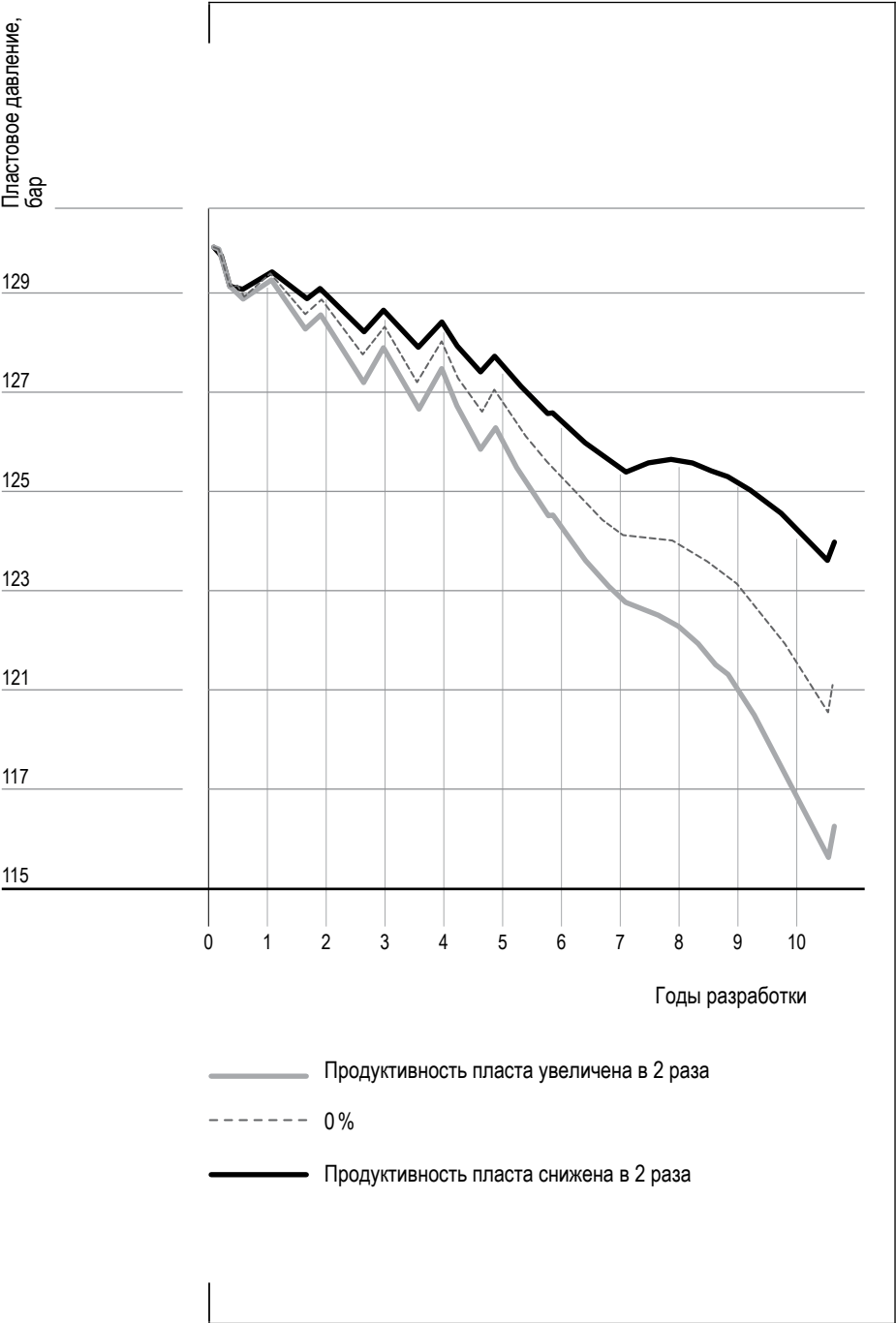
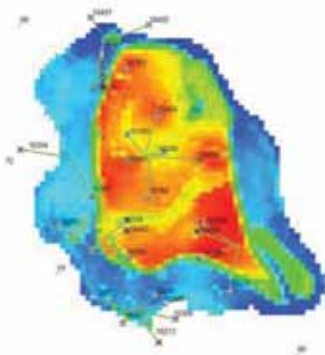


Рис. 5.

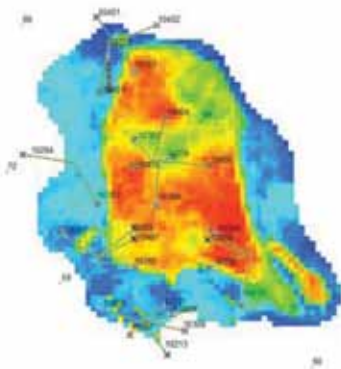
Пример отклика давления на варьирование профиля притока пласта ПК₈.

Fig. 5. Example of the pressure response to the variation of the inflow profile of the PK8 formation.

а



б



в

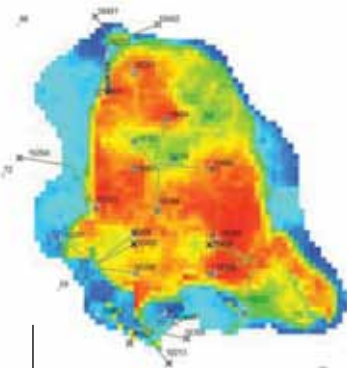


Рис. 7.

Пример отклика продвижения фронта воды на варьирование профиля притока пласта ПК₈ (а – настроенная модель, б – продуктивность пласта ПК₈ увеличена, в – продуктивность пласта ПК₈ уменьшена).

Fig. 7. Example of the response of the advance of the water front to the variation of the inflow profile of the PK₈ formation (a – tuned model, b – productivity of the PK₈ formation increased, c – productivity of the PK₈ formation decreased).

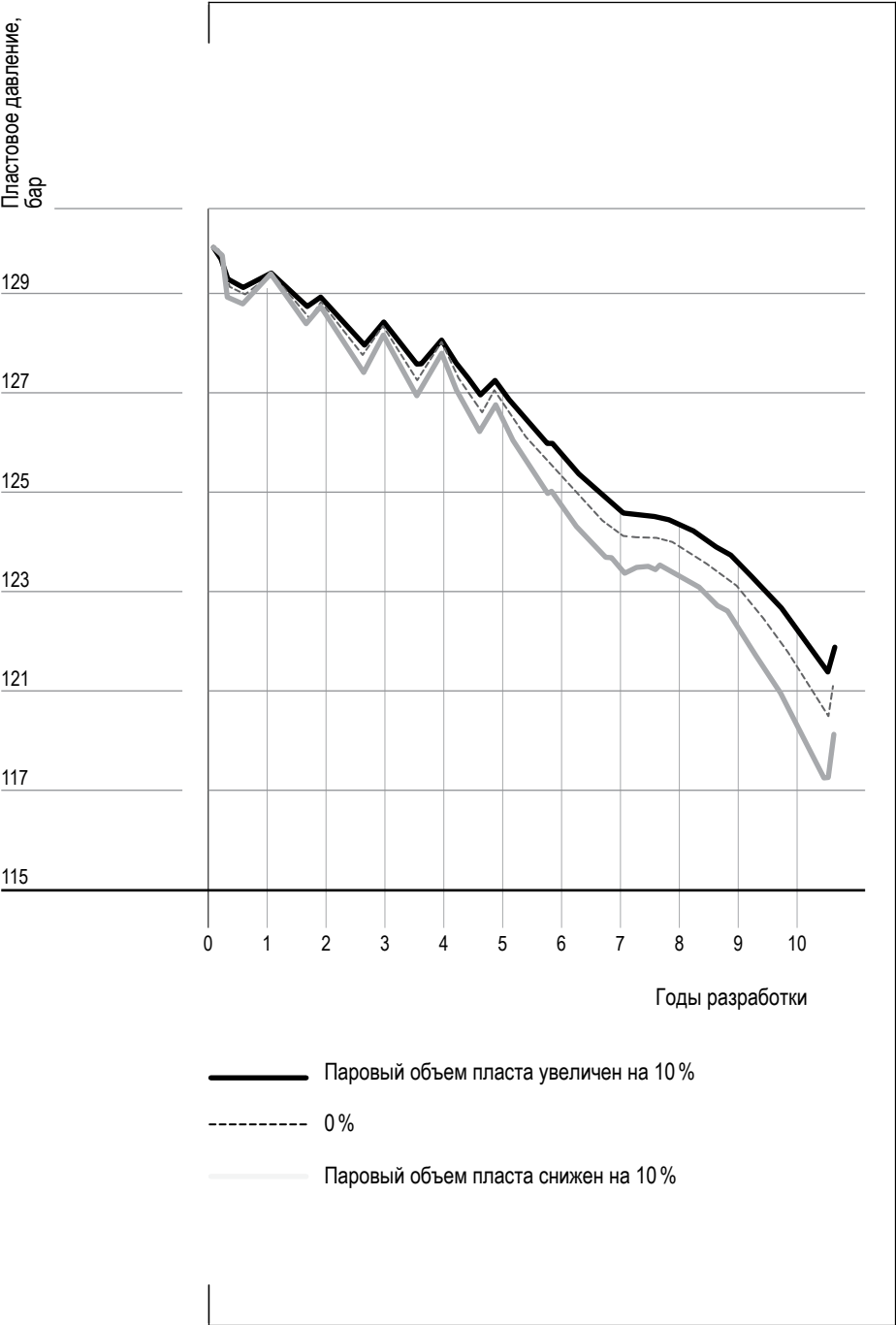


Рис. 8. Пример отклика давления на варьирование порового объема пласта PK₈.
Fig. 8. Example of the pressure response to the variation of the pore volume of the PK₈ formation.

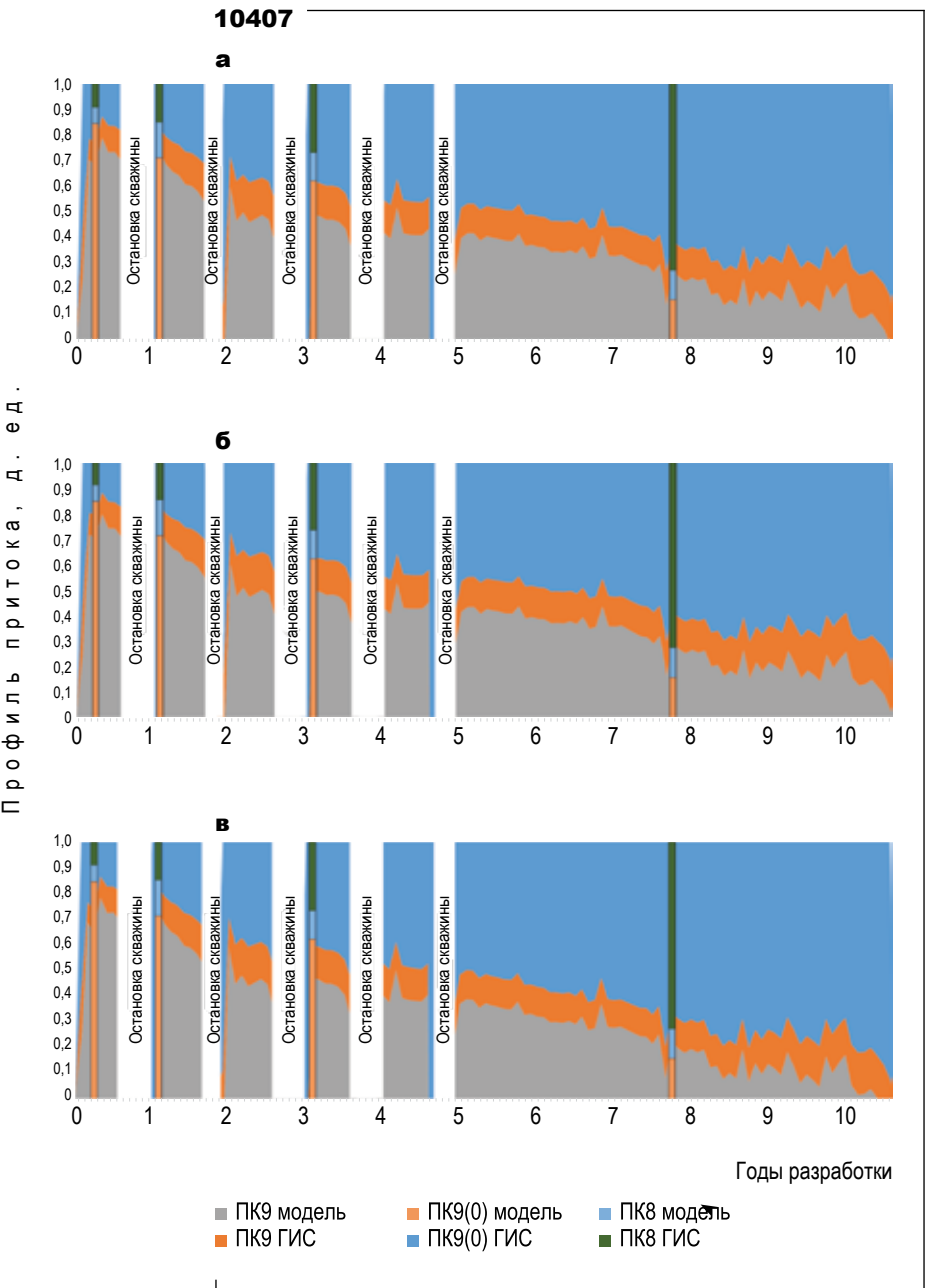
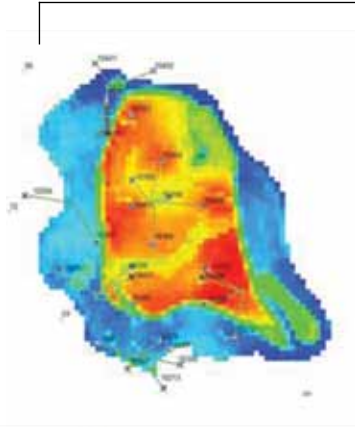


Рис. 9.

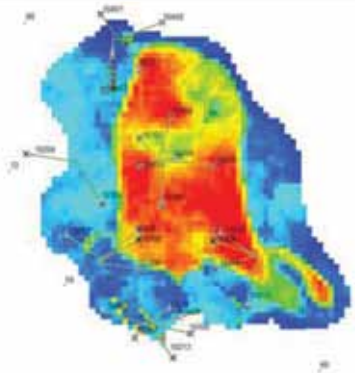
Пример отклика доли добычи газа с пласта на варьирование порового объема пласта PK_8 (а – настроенная модель, б – поровый объем пласта PK_8 уменьшен, в – поровый объем пласта PK_8 увеличен).

Fig. 9. Example of the response of the share of gas production from the reservoir to the variation of the pore volume of the PK_8 formation (a – tuned model, b – the pore volume of the PK_8 formation is reduced, c – the pore volume of the PK_8 formation is increased).

а



б



в

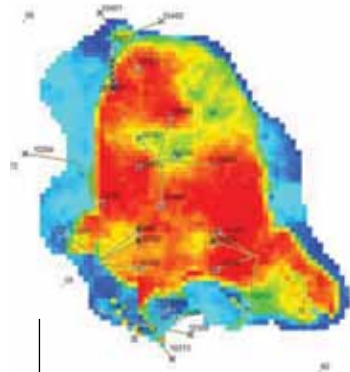


Рис. 10. Пример отклика продвижения фронта воды на варьирование порового объема пласта ПК₈ (а – настроенная модель, б – поровый объем пласта ПК₈ уменьшен, в – поровый объем пласта ПК₈ увеличен).
Fig. 10. Example of the response of the advance of the water front to the variation of the pore volume of the PK₈ formation (a – tuned model, b – the pore volume of the PK₈ formation is reduced, c – the pore volume of the PK₈ formation is increased).

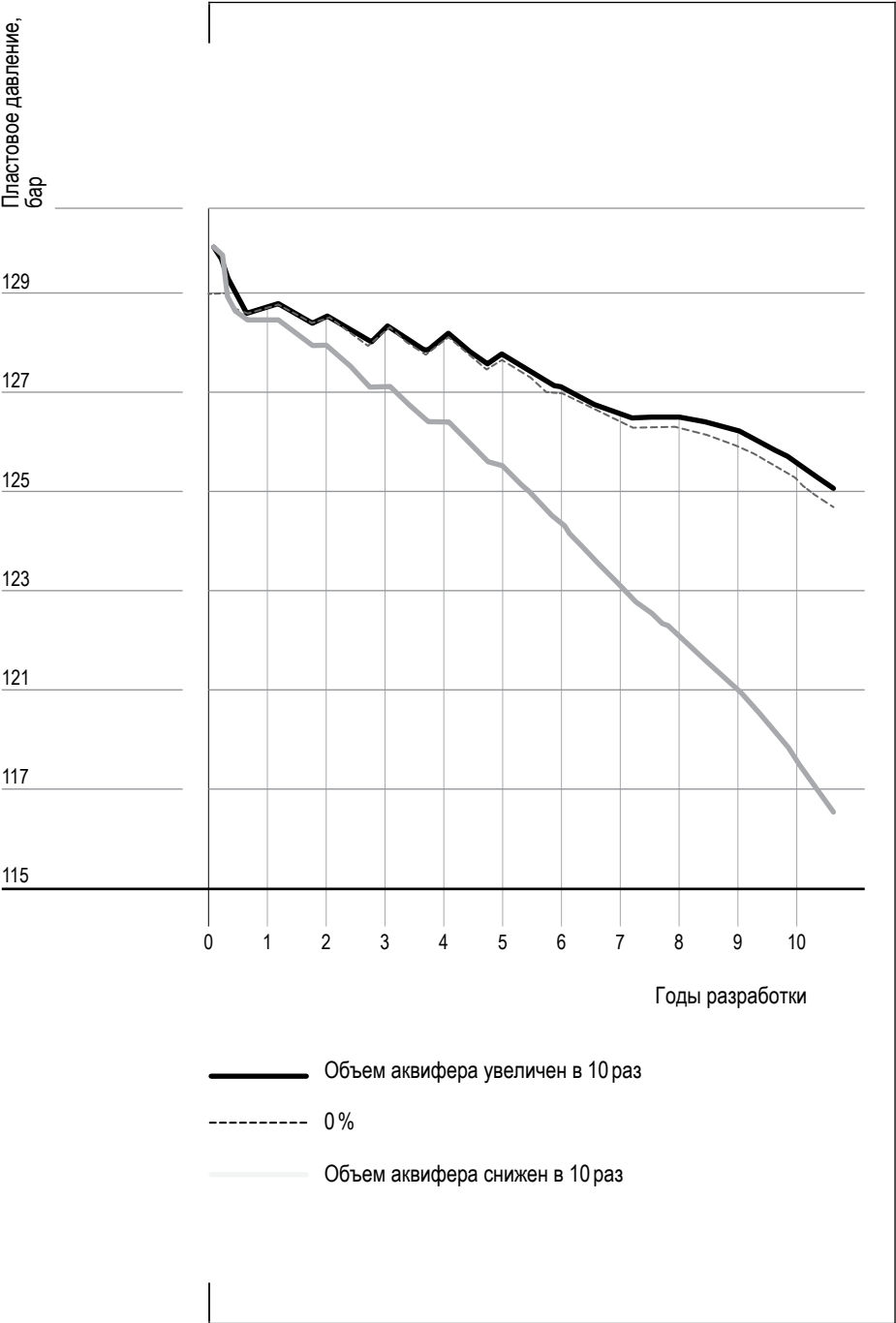


Рис. 11.

Пример отклика давления на варьирование объема аквифера пласта ПК₈.
Fig. 11. Example of the pressure response to the variation of the volume of the reservoir aquifer PK₈.

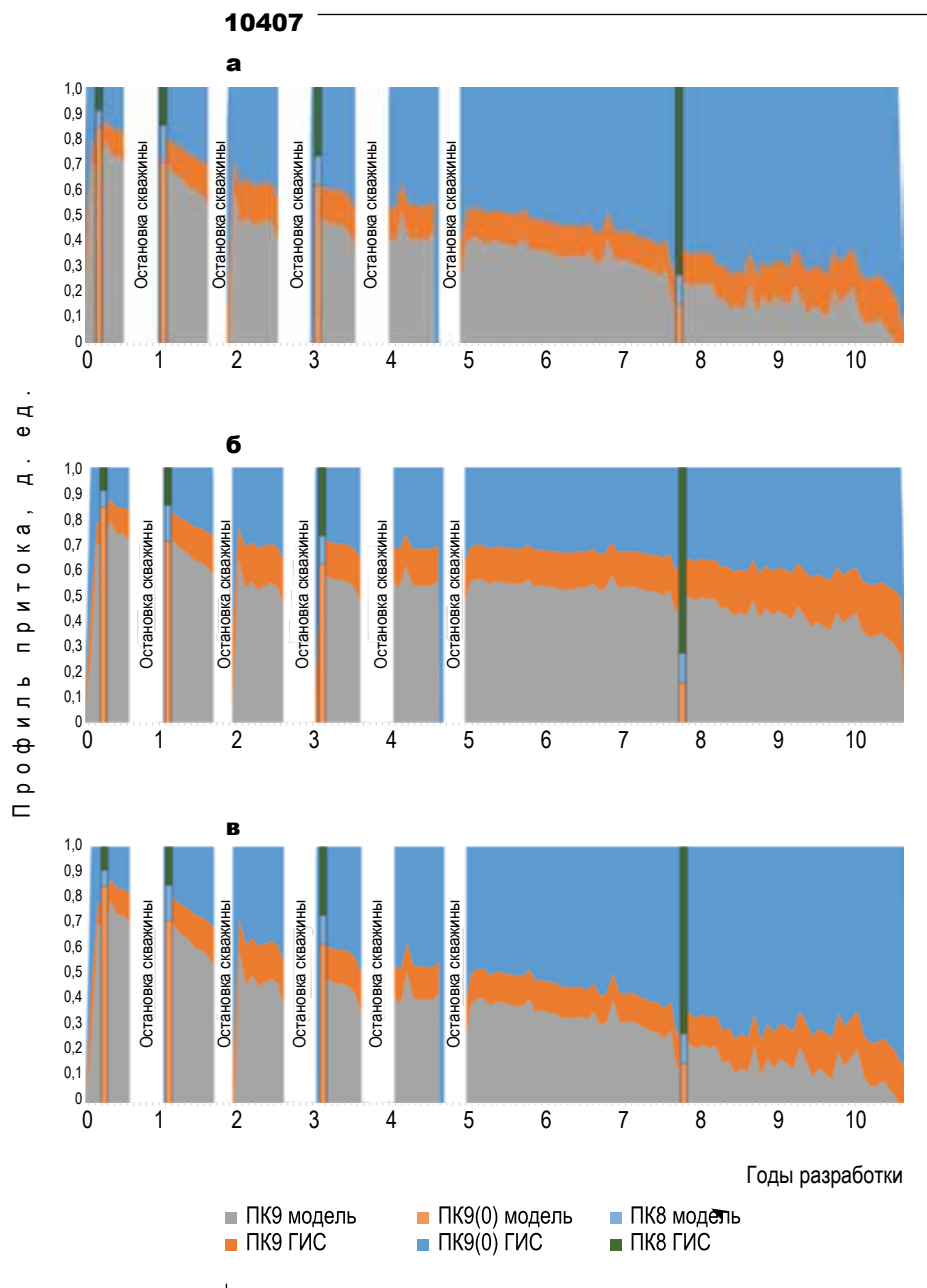


Рис. 12.

Пример отклика доли добычи газа с пласта на варьирование объема аквифера пласта ПК₈ (а – настроенная модель, б – объем аквифера пласта ПК₈ уменьшен, в – объем аквифера пласта ПК₈ увеличен).

Fig. 12. Example of the response of the share of gas production from the reservoir to the variation of the volume of the aquifer of the PK₈ formation (a – tuned model, b – the volume of the aquifer of the PK₈ formation is reduced, c – the volume of the aquifer of the PK₈ formation is increased).

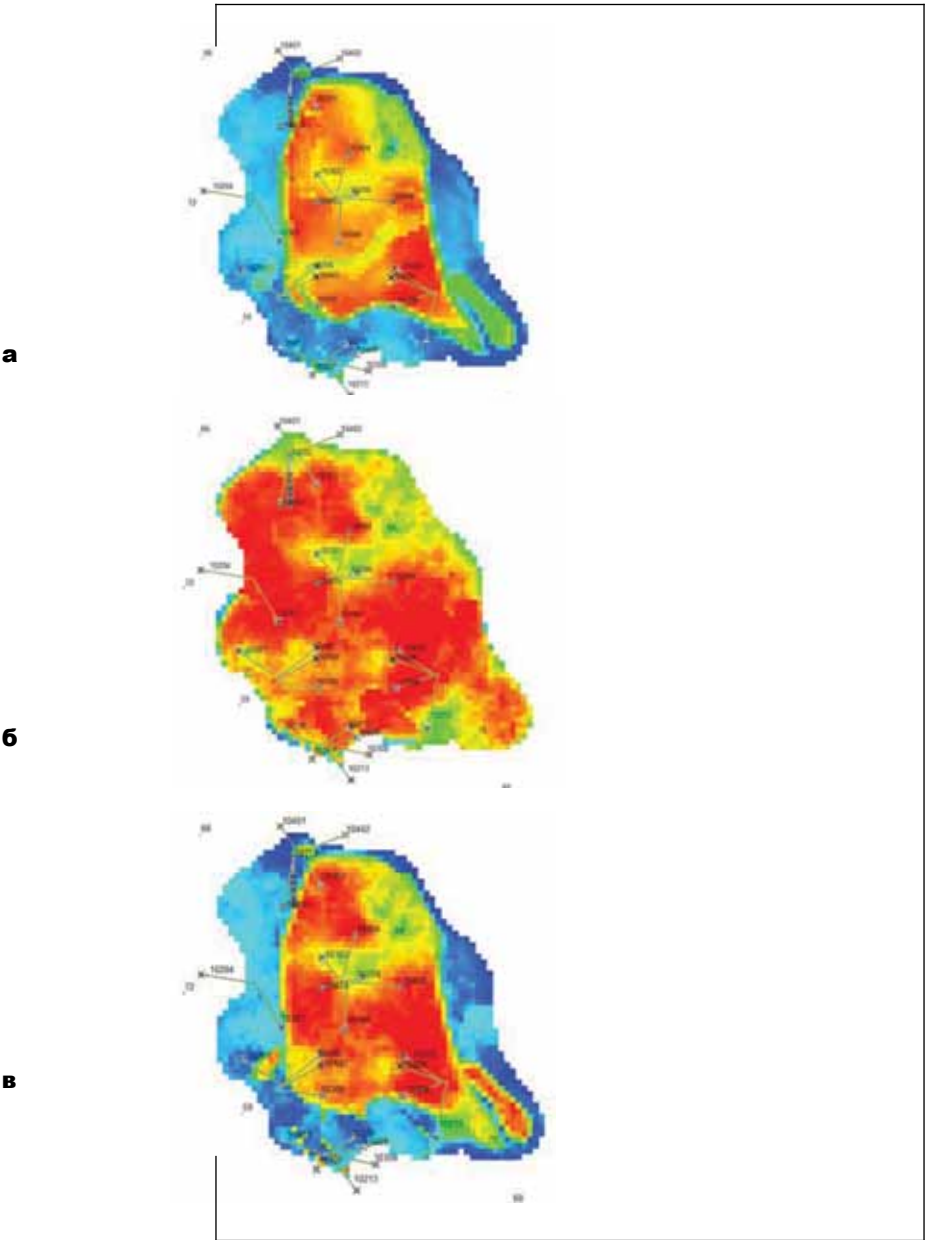


Рис. 13.

Пример отклика продвижения фронта воды на варьирование объема аквифера пласта PK_8 (а – настроенная модель, б – объем аквифера пласта PK_8 уменьшен, в – объем аквифера пласта PK_8 увеличен).

Fig. 13. Example of the response of the advance of the water front to the variation of the volume of the aquifer of the PK_8 formation (a – tuned model, b – the volume of the aquifer of the PK_8 formation is reduced, c – the volume of the aquifer of the PK_8 formation is increased).

Выводы

Таким образом, алгоритм адаптации многопластовой модели, в которой несколько пластов разрабатываются единой сеткой скважин, должен начинаться с адаптации профиля притока на начальную дату. Дальнейшее перераспределение профиля добычи должно происходить итерационно за счет баланса запасов залежей, объема и интенсивности водоносного горизонта, учитывая при этом фронт продвижения пластовых вод по результатам наблюдений на фонде скважин. Настройка профиля притока за счет изменения kh не рекомендуется, так как изменение профиля притока с течением времени чаще всего не является функцией от kh . Исключениями выступают моделирование ГТМ и эффектов внутри ствола скважины. При этом следует учитывать взаимовлияние вышеуказанных параметров одного пласта на все остальные пласты внутри эксплуатационного объекта.

Библиографический список

1. Ваганов Е.В., Краснов И.И., Томская В.Ф., Левитина Е.Е.: Опыт проведения ВИР на скважинах, эксплуатирующих газоконденсатные залежи Берегового месторождения // Наука. Инновации. Технологии. 2021. № 1. С. 27–38.
2. Дейк Л.П., Практический инжиниринг резервуаров. М.: Ижевск, 2008, 668 с.
3. Ершов С.Е., Меркулов А.В., Кирсанов С.А. и др. Моделирование реакции водонапорного бассейна при разработке залежи на истощение с оценкой влияния водорастворенного газа на динамику внедрения пластовой воды // Газовая промышленность. 2014. № 12. С. 18–21.
4. Закиров С.Н., Коршунова Л.Г., Нанивский Е.М.: Решение двумерной обратной задачи теории разработки газовых месторождений. / Сб. разр. и экспл. газ. и газоконд. мест. Изд. ВНИИЭГазпром. 1975. № 12. 28 с.
5. Закиров С.Н., Пискарев В.И., Гереш П.А., Ершов С.Е.: Способ разработки водоплавающих газовых и газоконденсатных месторождений. Патент РФ 2107154.
6. Закиров С.Н., Шмыгля О.П. Некоторые вопросы анализа разработки газовых месторождений при водонапорном режиме, ВНИИЭ – газпром, 1971, 40 с.
7. Каневская Р.Д. Математическое моделирование гидроди-

намических процессов разработки месторождений углеводородов: Ижевск, 2002. 130 с.

8. Кирсанов А.Н., Лапердин А.Н., Нелепченко Л.Е. Методология оперативной обработки геолого-геофизической информации при проектировании и разработке газовых месторождений // Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений, Вып. 4: изд. ВНИИЭ-ГАЗПРОМа, 1989. 69 с.
9. Красовский А.В., Кротов П.С. Использование трехмерного моделирования для изучения текущих пластовых условий газовой залежи Медвежьего месторождения. // Сб. тезисов докладов XIV Научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. Тюмень: ТюменНИИгипрогаз, 2006. 316 с.
10. Лапук Б.Б. Теоретические основы разработки месторождений природных газов. Ижевск, 2002. 296 с.
11. Майер В.П. Гидродинамическая модель фильтрации нефти, газа и воды в пористой среде. Екатеринбург: Путиведь, 2000. 207 с.
12. Мирзаджанзаде А.Х., Кузнецов О.Л., Басниев К.С., Алиев З.С. Основы технологии добычи газа. М.: Недра, 2003. 880 с.
13. Муравьев И.М., Андриасов Р.С., Гиматулинов Ш.К., Говорова Г.Л., Полозков В.Т. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений. М.: Недра, 1970. 448 с.
14. Назаров А. В. Развитие математического моделирования для проектирования и анализа разработки нефтегазоконденсатных месторождений: дис. д-ра техн. наук. Ухта, 2012. 427 с.
15. Григорьев Б.А. и др. Обзор работ по теории фильтрации углеводородных систем // Вести газовой науки. 2017. № 2. С. 182–202.
16. Сыртланов В.Р. О некоторых вопросах адаптации моделей месторождений углеводородов // Тезисы докл. конференции молодых ученых ЛУКОЙЛ, Москва, 2001. С. 198–236.
17. Требин Ф. А., Закиров С. Н., Кондрат Р. М. и др. Исследование особенностей проявления водонапорного режима при разработке газовых месторождений. ВНИИЭГазпром, 1970. 57 с.
18. Чивилева О.В., Абрамов Т.А., Хмара О.А. Определение характера насыщения пластов-коллекторов и типа месторождений на основе гидродинамических исследований

и изучения пластовых проб // Проблемы геологии и освоения недр: XIV Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых имени академика М.А. Усова. Томск, 2010. 580 с.

19. Юшков А.Ю., Красовский А.В., Тенкачева И.Ш. Методика построения карт продвижения контактов при проведении расчетов на трехмерной газогидродинамической модели (тезисы) // Проблемы развития газовой промышленности Западной Сибири: Сб. тезисов докладов XIII научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. Тюмень: ТюменНИИгипрогаз, 2004. 348 с.
20. Luca Cosentino. Integrated Reservoir Studies. Editions Technip, Paris, 2001, 310 p.

References

1. Vaganov E.V., Krasnov I.I., Tomsкая V.F., Levitina E.E.: Experience of execution WIW at wells exploiting gas condensate deposits of the Beregovoye field. Science. Innovations. Technologies. 2021. No. 1. P. 27–38. (In Russ.)
2. Dyke L.P., The practice of reservoir engineering. Moscow: Izhevsk, 2008, 668 p. (In Russ.)
3. Ershov S.E., Merkulov A.V., Kirsanov S.A. and others. Modeling of the reaction of a water-pressure basin during the development of a deposit for depletion with an assessment of the effect of water-dissolved gas on the dynamics of the introduction of reservoir water. Gas Industry. 2014. No.12. P. 18–21. (In Russ.)
4. Zakirov S.N., Korshunova L.G., Nanivsky E.M.: Solving a two-dimensional inverse problem of the theory of gas field development. Col. of dev. and oper. gas. and gascond. VNIIEGazprom Publishing House. 1975. No. 12. 28 p. (In Russ.)
5. Zakirov S.N., Piskarev V.I., Geresh P.A., Ershov S.E.: A method for developing waterfowl gas and gas condensate fields. Patent of the Russian Federation 2107154. (In Russ.)
6. Zakirov S.N., Shmyglya O.P. Some questions of analysis of the development of gas fields in water–pressure mode, VNIIE – gazprom, 1971. 40 p. (In Russ.)
7. Kanevskaya R.D. Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbon deposits development: Izhevsk, 2002. 130 p. (In Russ.)
8. Kirsanov A.N., Laperdin A.N., Nelepchenko L.E. Methodology of operational processing of geological and geophysical infor-

- mation in the design and development of gas fields. Development and operation of gas and gas condensate fields, Rel. No. 4: pub. VNIIEGAZPROM, 1989. 69 p. (In Russ.)
9. Krasovsky A.V., Krotov P.S.: Using 3D-modeling to study the current reservoir conditions of the gas deposit of the Medvezhye deposit. Collection of abstracts of the XIV Scientific and Practical Conference of young scientists and specialists. Tyumen: LLC TyumenNIIgiprogaz, 2006. 316 p. (In Russ.)
 10. Lapuk B.B. Theoretical foundations of the development of natural gas deposits: Izhevsk, 2002. 296 p. (In Russ.)
 11. Mayer V.P. Reservoir simulation of oil, gas and water filtration in a porous medium. Ekaterinburg: "Putived", 2000. 207 p. (In Russ.)
 12. Mirzajanzade A.H., Kuznetsov O.L., Basniev K.S., Aliyev Z.S. Fundamentals of gas production technology: Nedra, 2003. 880 p. (In Russ.)
 13. Muravyev I.M., Andriasov R.S., Gimatudinov Sh.K., Govorova G.L., Polozkov V.T. Development and exploitation of oil and gas fields: "Nedra", 1970. 448 p. (In Russ.)
 14. Nazarov A.V. The development of mathematical modeling for the design and analysis of the development of oil and gas condensate fields: dis. of Doctor of Technical Sciences. Ukhta, 2012. 427 p. (In Russ.)
 15. Grigoriev B.A. et al. Review of works on the theory of filtration of hydrocarbon systems. Vesti gazovoi nauki. 2017. No. 2. P. 182–202. (In Russ.)
 16. Syrtlanov V.R. On some questions of adaptation of models of hydrocarbon deposits. Theses of reports Conferences of Young scientists of OAO LUKOIL, Moscow, 2001. P. 198–236. (In Russ.)
 17. Trebin F. A., Zakirov S. N., Kondrat R. M. et al. Investigation of the peculiarities of the manifestation of the water pressure regime in the development of gas fields. VNIIEGazprom, 1970. 57 p. (In Russ.)
 18. Chivileva O.V., Abramov T.A., Khmara O.A. Determination of the nature of reservoir saturation and the type of deposits based on hydrodynamic researches and the study of reservoir samples. Problems of geology and subsoil development: XIV International Scientific Symposium of Students and Young Scientists named after Academician M.A. Usov. Tomsk, 2010. 580 c. (In Russ.)
 19. Yushkov A.Yu., Krasovsky A.V., Tenkacheva I.Sh. : Methodol-

- ogy for constructing contact promotion maps when performing calculations on a three-dimensional gas-hydrodynamic model (theses). Problems of development of the gas industry in Western Siberia. Collection of abstracts of the XIII Scientific and Practical Conference of Young scientists and specialists. Tyumen: LLC TyumenNIlgiprogaz, 2004. 318 p. (In Russ.)
20. Luca Cosentino. Integrated Reservoir Studies. Editions Technip, Paris, 2001, 310 p.

**Статья поступила в редакцию 27.02.2023,
статья одобрена после рецензирования 25.05.2023,
статья принята к публикации 31.08.2023.**

**The article was submitted to the editorial office 27.02.2023,
the article was approved after reviewing 25.05.2023,
the article was accepted for publication 31.08.2023.**

Информация об авторах

Курин Константин Кириллович, начальник лаборатории анализа и проектирования разработки месторождений Надымского района центра разработки и эксплуатации месторождений Западной Сибири «Газпром ВНИИГАЗ» г. Тюмень,
E-mail: K_Kurin@gwise.vniigaz.gazprom.ru

Загородских Иван Александрович, инженер лаборатории мониторинга и оценки эффективности месторождений Западной Сибири центра разработки и эксплуатации месторождений Западной Сибири «Газпром ВНИИГАЗ» г. Тюмень,
E-mail: I_Zagorodskikh@gwise.vniigaz.gazprom.ru

Information about the authors

Konstantin K. Kurin, Head of the Laboratory for Analysis and Design of field Development in the Nadym district of the Center for Development and Exploitation of Fields in Western Siberia, Gazprom VNIIGAZ LLC, Tyumen,
E-mail: K_Kurin@gwise.vniigaz.gazprom.ru

Ivan A. Zagorodskikh, Engineer of the Laboratory for Monitoring and Evaluating the Effectiveness of Deposits in Western Siberia of the Center for the Development and Operation of Deposits in Western Siberia, Gazprom VNIIGAZ LLC, Tyumen,
E-mail: I_Zagorodskikh@gwise.vniigaz.gazprom.ru

2.8.4.
УДК: 622.276
DOI:

РАЗРАБОТКА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ НЕФТЯНЫХ
И ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
10.37493/2308-4758.2023.3.7

Мулявин С.Ф.,
Бяков А.В.,
Нещадимов Р.А.

Тюменский индустриальный университет
г. Тюмень,
Россия

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ НЕФТЕ- ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ

Введение.

Нефтегазоконденсатное месторождение X располагается в Томской области и относится к Васюганской нефтегазоносной области Западносибирской нефтегазоносной провинции. В разрезе месторождения выделены 5 объектов разработки: Ю₁¹, Ю₁², Ю₁³⁻⁴, Ю₃ и Ю₄₋₅. Изученные объекты являются сложными с точки зрения геологического строения и фазового состояния флюидов. К осложняющим разработку факторам относятся: низкая проницаемость коллекторов, наличие водонефтяных и газонефтяных зон, сложный состав флюид, фазовое состояние залежи близкое к критическому. Изучение опыта разработки сложных объектов является актуальной задачей. Полученная в результате информация может быть в дальнейшем использована при проектировании разработки месторождений-аналогов.

Материалы и методы
исследований.

Объектом исследования выступают эксплуатационные объекты нефтегазоконденсатного месторождения X. В статье представлены результаты проведённого анализа разработки месторождения, изучена динамика технологических показателей, структура фонда и изучено энергетическое состояние введенных в эксплуатацию объектов. В качестве информационного источника использована проектно-техническая документация на разработку месторождения X, в том числе включающая в себя материалы исследований методом кривой восстановления давления (КВД), на основании которых было установлено влияние снижения пластового давления на продуктивность добывающих скважин.

Результаты исследований
и их обсуждение.

На Месторождении X в разработку введены объекты Ю₁¹ и Ю₁², включающие нефтяную и нефтяную залежь с газовой шапкой. Газоконденсатные объекты не эксплуатируются. В целом месторождение находится на начальной стадии разработки. Для пласта Ю₁¹ по проектному документу реализуется треугольная сетка размещения скважин с шагом 700 м с фор-

мированием обращенной семиточечной системой заводнения. На объекте Ю₁² – трехрядная система разработки 700 × 700 м. Несмотря на низкие фильтрационно-ёмкостные свойств коллекторов входные дебиты скважин высокие, что объясняется свойствами флюидов месторождения X. Единственным применённым на месторождении на данный момент методом интенсификации добычи является гидроразрыв пласта. Неблагоприятные факторы с точки зрения разработки месторождения были выявлены в ходе анализа динамики изменения пластового давления. На месторождении был проведён ряд исследований для определения влияния снижения пластового давления на процесс добычи углеводородного сырья.

Выводы. В ходе проведённых на месторождении исследований выявлено необратимое негативное влияние снижения пластового давления ниже давления насыщения на продуктивность скважин. Рост газового фактора отмечается даже при незначительном снижении пластового давления, особенно на пласте Ю₁¹. Ввод нагнетательных скважин позволил стабилизировать пластовое давление, но основные проблемы разработки данных сложных объектов остаются нерешёнными. Для оптимизации дальнейшей эксплуатации данных залежей необходима комплексная реализация предлагаемых проектных решений.

Ключевые слова: разработка, нефтегазоконденсатное месторождение, фонд скважин, пластовые давления, газовый фактор, пластовое давление

Mulyavin S.F., Tyumen Industrial University,
Byakov A.V., Tyumen,
Neshchadimov R.A. Russia

**Features of the Development of Oil and Gas
Condensate Field in the Tomsk Region**

Introduction. Oil and gas condensate field X is located in the Tomsk region and belongs to the Vasyugan oil and gas region of the West Siberian oil and gas province. In the section of the field, 5 development objects were identified: J₁¹, J₁², J₁³⁻⁴, J₃ and J₄₋₅. The studied objects are complex in terms of geological structure and phase state of the fluids. The factors complicating the development include low reservoir permeability, the presence of water-oil and gas-oil zones, the complex composition of the fluid, the phase state of the deposit is close

to critical. Studying the experience of developing complex objects is an urgent task. The resulting information can be further used in the design of the development of analogue deposits.

Materials and research methods.

The object of the study is the operational facilities of the oil and gas condensate field X. The article presents the results of the analysis of the development of the field; the dynamics of technological indicators, the structure of the fund, and the energy state of the commissioned facilities are studied. The design and technical documentation for the development of the X field was used as an information source, including the materials of studies by the pressure recovery curve (PRC) method, on the basis of which the effect of a decrease in reservoir pressure on the productivity of production wells was established.

Research results and their discussion.

At Field X, objects J_1^1 and J_1^2 were put into development, including oil and oil deposits with a gas cap. Gas condensate facilities are not operated. In general, the field is at the initial stage of development. For the J_1^1 formation, according to the design document, a triangular well placement grid is implemented with a step of 700 m with the formation of an inverted seven-point flooding system. The J_1^2 facility has a three-row development system 700×700 m. Despite the low porosity and permeability properties of the reservoirs, the input well flow rates are high, which is explained by the properties of the fluids of the X field. The only stimulation method currently used at the field is hydraulic fracturing. Adverse factors in terms of field development were identified during the analysis of the dynamics as regards the changes in reservoir pressure. A number of studies were carried out at the field to determine the effect of lowering reservoir pressure on the process of hydrocarbon production.

Conclusions.

In the course of the studies carried out at the field, an irreversible negative effect of a decrease in reservoir pressure below saturation pressure on well productivity was revealed. Gas/oil ratio growth is noted even with a slight decrease in reservoir pressure, especially in the J_1^1 formation. The introduction of injection wells allowed stabilizing the reservoir pressure, but the main problems in the development of these complex objects remain unresolved. To optimize the further exploitation of these deposits, a comprehensive implementation of the proposed design solutions is required.

Keywords:

development, oil and gas condensate field, well stock, reservoir pressures, gas/oil ratio, reservoir pressure

Введение

Нефтегазоконденсатное месторождение X располагается в Парабельском районе Томской области северо-западнее Томска и относится к Васюганской нефтегазоносной области Западносибирской нефтегазоносной провинции. Открыто в 1967 году, в разработку введено в 2004.

Промышленная нефтегазоносность приурочена к юрским отложениям тюменской и васюганской свиты. В разрезе месторождения выделены 5 объектов разработки: Ю₁¹, Ю₁², Ю₁³⁻⁴, Ю₃ и Ю₄₋₅. По объёму извлекаемых запасов углеводородов месторождение относится к категории крупных.

По состоянию на 01.01.2012 в разработку был введён объект Ю₁¹ содержащий одну нефтяную залежь и объект Ю₁² содержащий одну нефтяную залежь с газовой шапкой. Оба объекта находятся на первой стадии разработки, проектный фонд полностью не реализован. Изученные объекты являются сложными с точки зрения геологического строения и фазового состояния флюидов. К осложняющим разработку факторам относятся: низкая проницаемость коллекторов, наличие водонефтяных и газонефтяных зон, сложный состав флюид, фазовое состояние залежи близкое к критическому.

Изучение опыта разработки сложных объектов является актуальной задачей. Полученная в результате информация может быть в дальнейшем использована при проектировании разработки месторождений-аналогов.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования выступают эксплуатационные объекты Ю₁¹, Ю₁², Ю₁³⁻⁴, Ю₃ и Ю₄₋₅ нефтегазоконденсатного месторождения X, расположенного в Парабельском районе Томской области.

В статье представлены результаты проведённого анализа разработки месторождения, изучена динамика технологических показателей, структура фонда и изучено энергетическое состояние введённых в эксплуатацию объектов.

В качестве информационного источника использована проектно-техническая документация на разработку месторождения X,

в том числе включающая в себя материалы исследований методом кривой восстановления давления (КВД), на основании которых было установлено влияние снижения пластового давления на продуктивность добывающих скважин [18].

В ходе выполнения анализа динамики технологических показателей и результатов выполненных геолого-технических мероприятий (ГТМ) использована специализированная литература, посвящённая разработке нефтяных и газовых месторождений [4, 9, 13, 14, 17].

Проектные решения и ГТМ, рекомендованные для оптимизации процесса разработки, составлены на основании изучения опыта применения ГТМ в схожих геологических условиях. В работах [1, 3, 5, 10, 11, 12, 16] представлен опыт применения гидроразрыва пласта (ГРП), в работах [2, 19, 20] проанализированы результаты применения мероприятий, направленных на предотвращение обводнения скважин, [4, 6, 7, 8, 15, 17] посвящены разработке месторождений с близкими характеристиками продуктивных пластов.

Результаты исследований и их обсуждение

Из пяти выделенных на месторождении эксплуатационных объектов на 01.01.2012 г. в разработке находились объекты Ю₁¹ и Ю₁², содержащие одну нефтяную и одну нефтяную залежь с газовой шапкой, соответственно. Газоконденсатные объекты Ю₁³⁻⁴, Ю₃ и Ю₄₋₅ в разработку не были введены.

На начало 2012 года на месторождении Х было пробурено 78 скважин: 54 добывающих; 10 нагнетательных; 3 скважин в консервационном фонде, 2 в пьезометрическом, 7 скважин ликвидированы; 2 водозаборные.

Согласно действующей классификации, месторождение Х относится к крупным по величине извлекаемых запасов [9]. Начальные извлекаемые запасы нефти оцениваются в 39,4 млн т при коэффициенте извлечения нефти (КИН) — 0,461. Запасы свободного газ объектов Ю₁³⁻⁴, Ю₃ и Ю₄₋₅ и газа газовой шапки объекта Ю₁² — 13913 млн м³. Начальные извлекаемые запасы конденсата — 777 тыс. т, коэффициент извлечения конденсата (КИК) — 0,629. На начало 2012 года накопленная добыча нефти по месторождению состав-

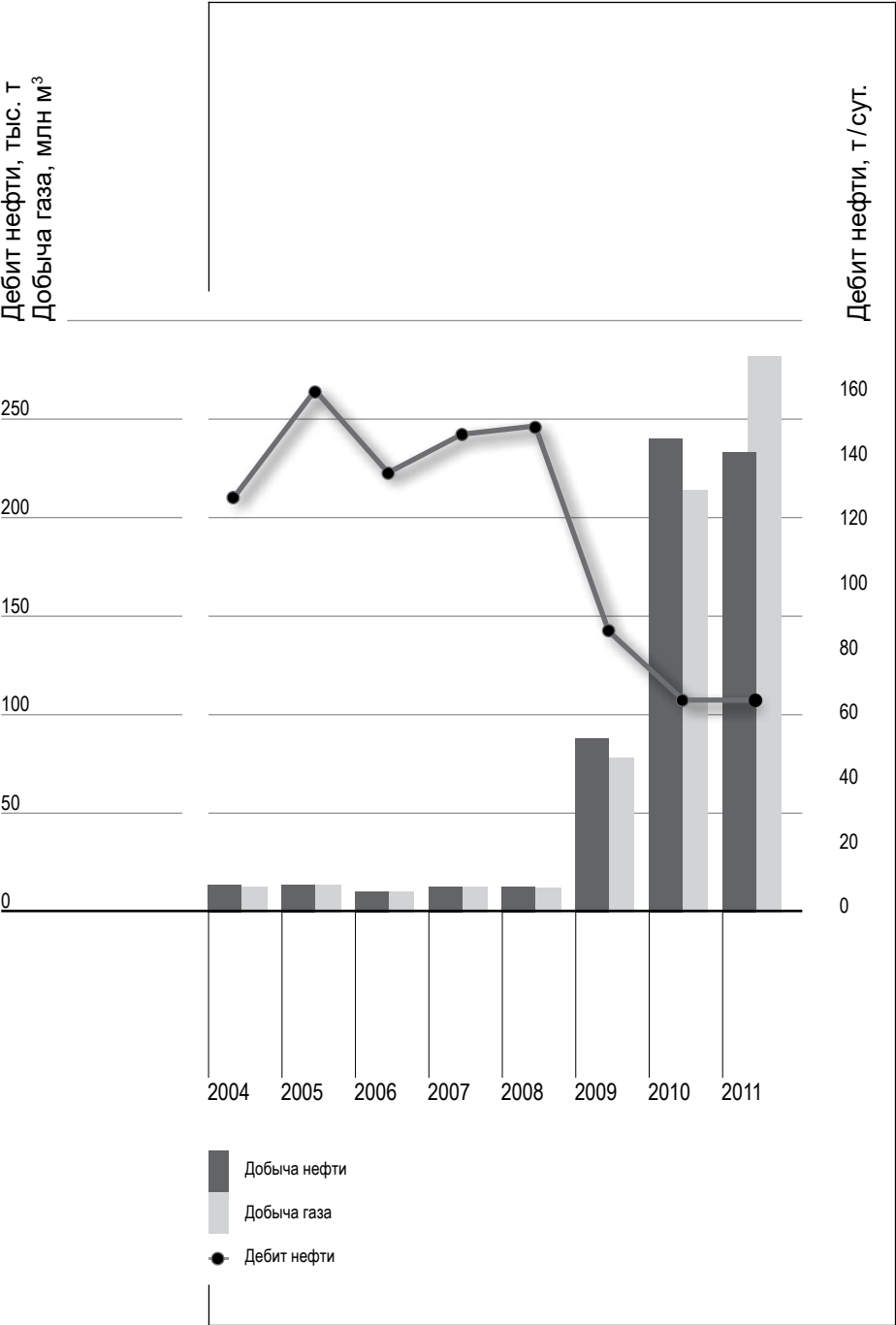


Рис. 1. Динамика основных технологических показателей. Объект Ю₁¹.
Fig. 1. Dynamics of the main technological indicators. Object J₁¹.

ляла 1781,8 тыс. т, жидкости — 1773,6 тыс. т, растворённого газа — 1048,4 млн м³.

Нефтяная залежь пласта Ю₁¹ — пластовая — сводовая, коллектор — терригенный, поровый, характеризуется коэффициентом пористости, равным 0,1 д. ед., коэффициент проницаемости — 0,043 мкм², невысокой нефтенасыщенной толщиной — 3,1 м. Нефть очень лёгкая («летучая», $\rho_n = 0,721$ г/см³), маловязкая ($\mu_n = 0,04$ мПа*с) с высоким газосодержанием (884 м³/т)

При изучении данной залежи её критическое фазовое состояние не позволило однозначно идентифицировать тип залежи. Так, по результатам гидродинамических исследований скважин газосодержание продукции изменялось от 378 до 2323 м³/т.

Для пласта Ю₁¹, согласно проектному документу, утверждена обращенная семиточечная система разработки с размещения скважин по треугольной сетке с шагом 700 м.

Добычу нефти из пласта Ю₁¹ с начала разработки осуществляли 26 скважин (25 скважин, эксплуатировавших только Ю₁¹ и одна скважина, вскрывающая совместно Ю₁¹ и Ю₁²). На 01.01.2012 фонд действующих скважин составлял 21 единицу, все из них эксплуатировались фонтанным способом, в консервации находилась одна скважина и одна в ликвидации.

Начальные извлекаемые запасы нефти в пласте составляют 8,1 млн т, КИН утверждён на уровне 0,513. Накопленная за время разработки добыча нефти и жидкости по объекту Ю₁¹ составила 625,1 тыс. т и 626,2 тыс. т. соответственно, растворенного газа 625,7 млн м³, что составляет 35% от общей добычи месторождения, отбор от НИЗ 7,7%. Среднее значение обводненности добываемой продукции объекта Ю₁¹ 0,21%, дебиты нефти и газа 64,5 т/сут и 77,5 тыс. м³/сут [2]. Динамика технологических показателей отражена на рисунке 1.

Организация системы поддержания пластового давления (ППД) на объекте Ю₁¹ была начата с мая 2010 г., после перевода одной нагнетательной в отработку скважины под закачку. В 2011 г. под нагнетание воды были переведены ещё три скважины, накопленная закачка на 01.01.2012 составляла 295,3 тыс. м³. За 2011 год было закачано 271 тыс. м³ воды со средней приемистостью 351 м³/сут.

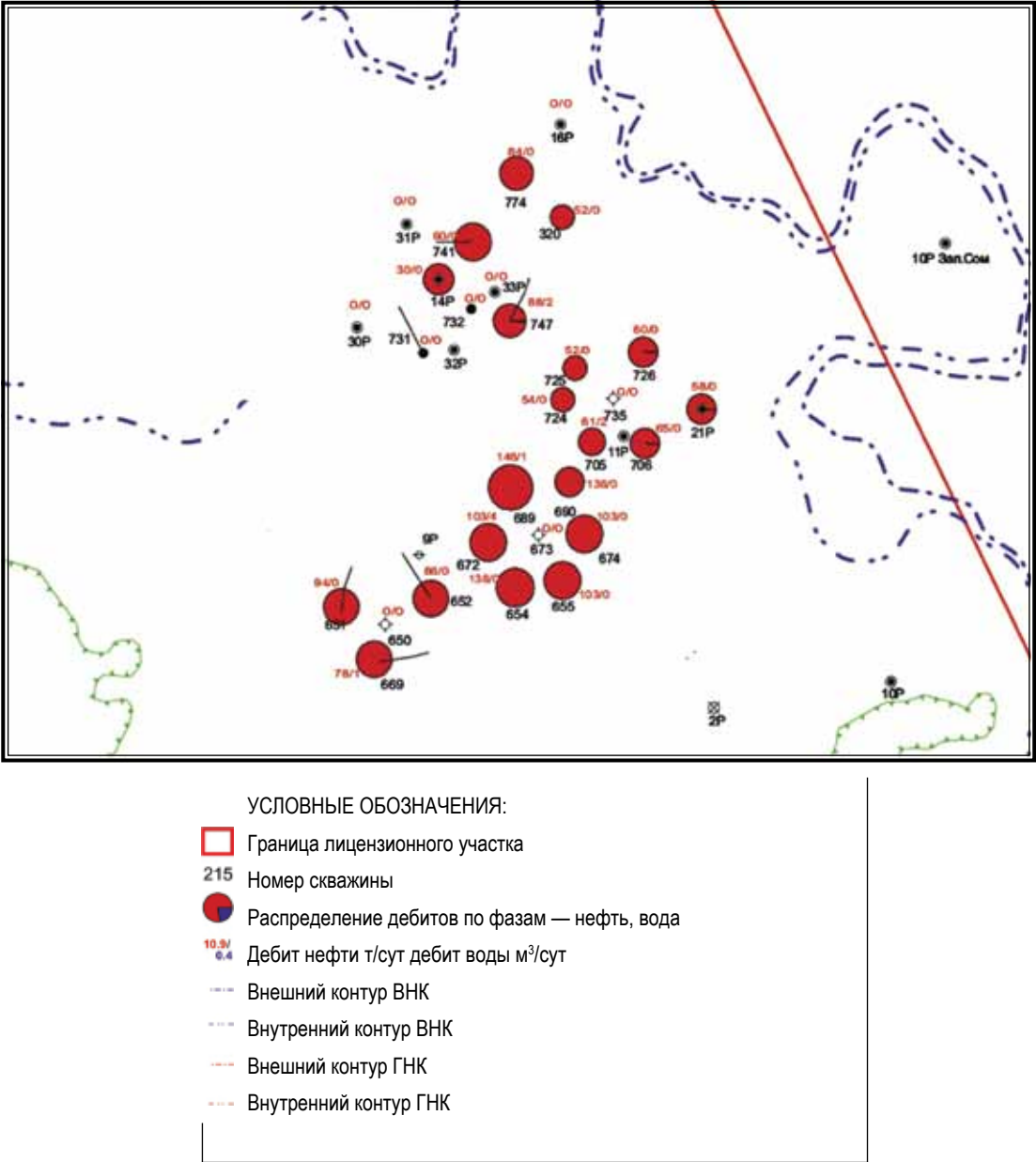


Рис. 2. Карта текущего состояния разработки.
Объект Ю₁¹.
Fig. 2. Map of the current state of development.
Object J₁¹.

Карта текущего состояния разработки представлена на рисунке 2.

Текущая компенсация составила лишь 30 %, несмотря на высокие значения приемистости скважин, переведённых под закачку воды. Величина средневзвешенного пластового давления в зоне отбора – 21,1 МПа (0,93 Р_{нас.}), среднее значение газового фактора возросло с 884 м³/т (2010 г.) до 1 119,4 м³/т (2011 г.) или на 27 % [18]. Рост газового фактора отмечается даже при незначительном снижении пластового давления. Динамика средневзвешенных давлений по картам изобар в зоне отбора приведена в таблице 1.

Таблица 1.

ДИНАМИКА СРЕДНЕВЗВЕШЕННЫХ ДАВЛЕНИЙ
В ЗОНЕ ОТБОРА

Table 1. Dynamics of weighted average pressures in the extraction zone

Годы	Объект Ю, ¹	Объект Ю, ²
2004	24,5	24,9
2005	24,5	24,7
2006	24,9	24,7
2007	24,7	24,5
2008	24,6	24,7
2009	23,74	23,8
2010	21,63	20,91
2011	21,1	18,71

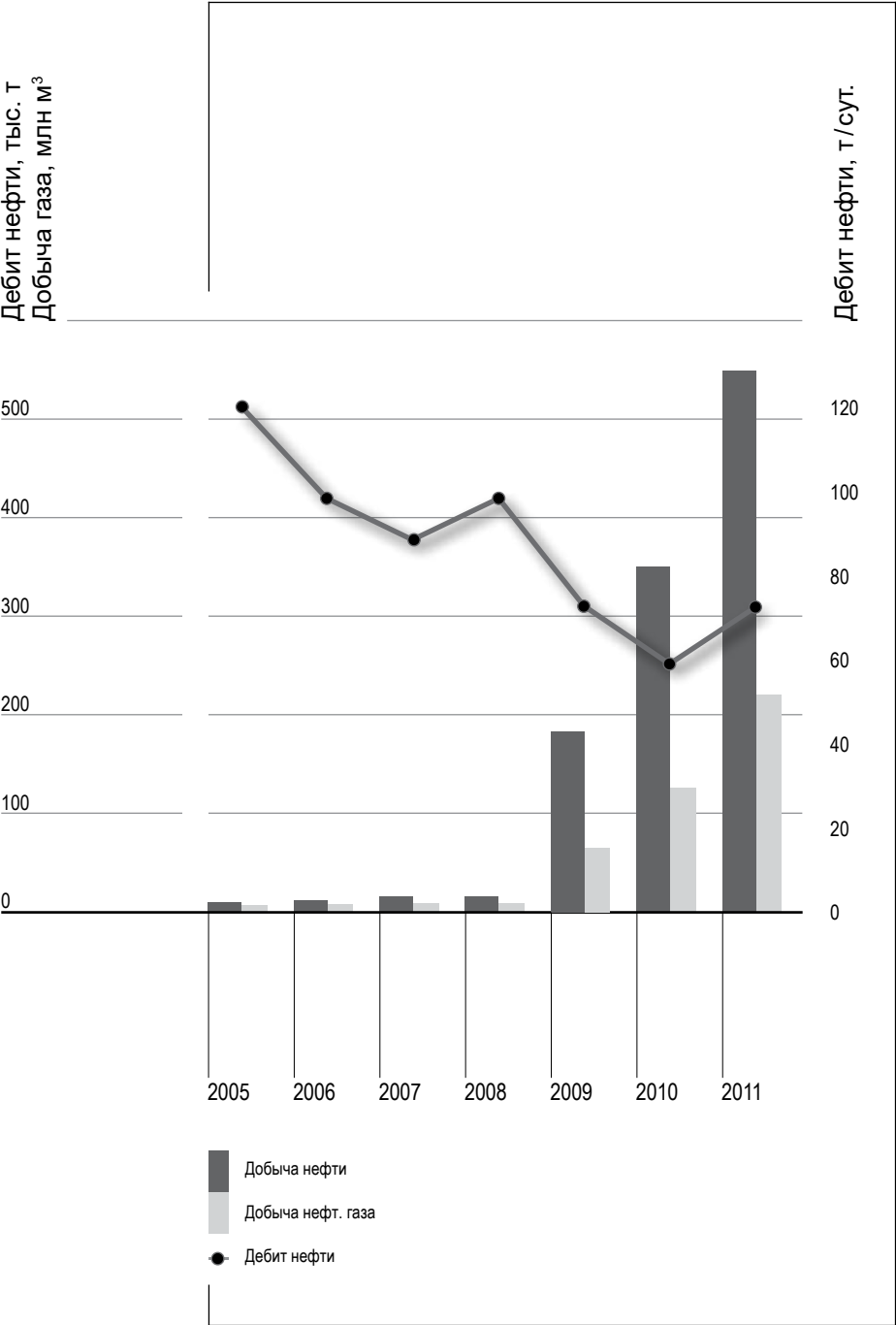


Рис. 3. Динамика основных технологических показателей. Объект Ю₁².
Fig. 3. Dynamics of the main technological indicators. Object J₁².

Нефтегазоконденсатная залежь пласта Ю₁² – пластовая сводовая, коллектор – терригенный, поровый, характеризуется коэффициентом пористости, равным 0,152 д. ед., коэффициентом проницаемости – 0,018 мкм², невысокой нефтенасыщенной толщиной – 6,6 м. Нефть легка ($\rho_n = 0,777$ г/см³), маловязкая ($\mu_n = 0,22$ мПа*с) с высоким газосодержанием (348 м³/т).

На объекте Ю₁² реализуется трехрядная система разработки 700 х 700 м с плотностью сетки скважин 49 га/скв.

Добычу нефти из пласта Ю₁² с начала разработки осуществляли 38 скважин. На 01.01.2012 в действующем фонде эксплуатационного объекта находилось 32 скважины, фонтанные – 26, ЭЦН – 6, две скважины в консервации, семь в ликвидации, одна в освоении после бурения, одна пьезометрическая.

Начальные извлекаемые запасы нефти (НИЗ) – 31,3 млн т, КИН утверждён на уровне 0,449. Накопленная добыча нефти и жидкости по объекту Ю₁² достигла 1136,7 тыс. т и 1147,4 тыс. т, соответственно, растворенного газа 422,7 млн м³, что составляет 65 % от общей добычи месторождения, отбор от НИЗ 3,6 %. Среднее значение обводненности добываемой продукции объекта Ю₁² – 1,4%, дебиты по нефти и газу 71,9 т/сут и 28,5 тыс. м³/сут. Динамика технологических показателей приведена на рисунке 3.

Организация системы поддержания пластового давления объекта Ю₁² была начата с 05.2010 г., после перевода одной нагнетательной в отработку на нефть скважины под закачку. В 2011 г. под закачку воды были переведены дополнительно пять скважин. Накопленная закачка на дату анализа равнялась 618,6 тыс м³, за 2011 год – 553,9 тыс. м³ воды со средней приемистостью 454 м³/сут.

Карта текущего состояния разработки приведена на рисунке 4.

Накопленная компенсация составила 55,6 %, несмотря на высокие значения приемистости скважин под закачкой. В зоне отбора средневзвешенное пластовое давление снизилось до 18,7 МПа (0,92 Р_{нас.}), среднее значение газового фактора возросло с 348 м³/т до 396,1 м³/т или на 14 %. Динамика средневзвешенных давлений по картам изобар в зоне отбора приведена в таблице 1.

В целом 18 скважин обеспечили основную часть накопленной добычи нефти месторождения. Накопленный отбор по ним соста-

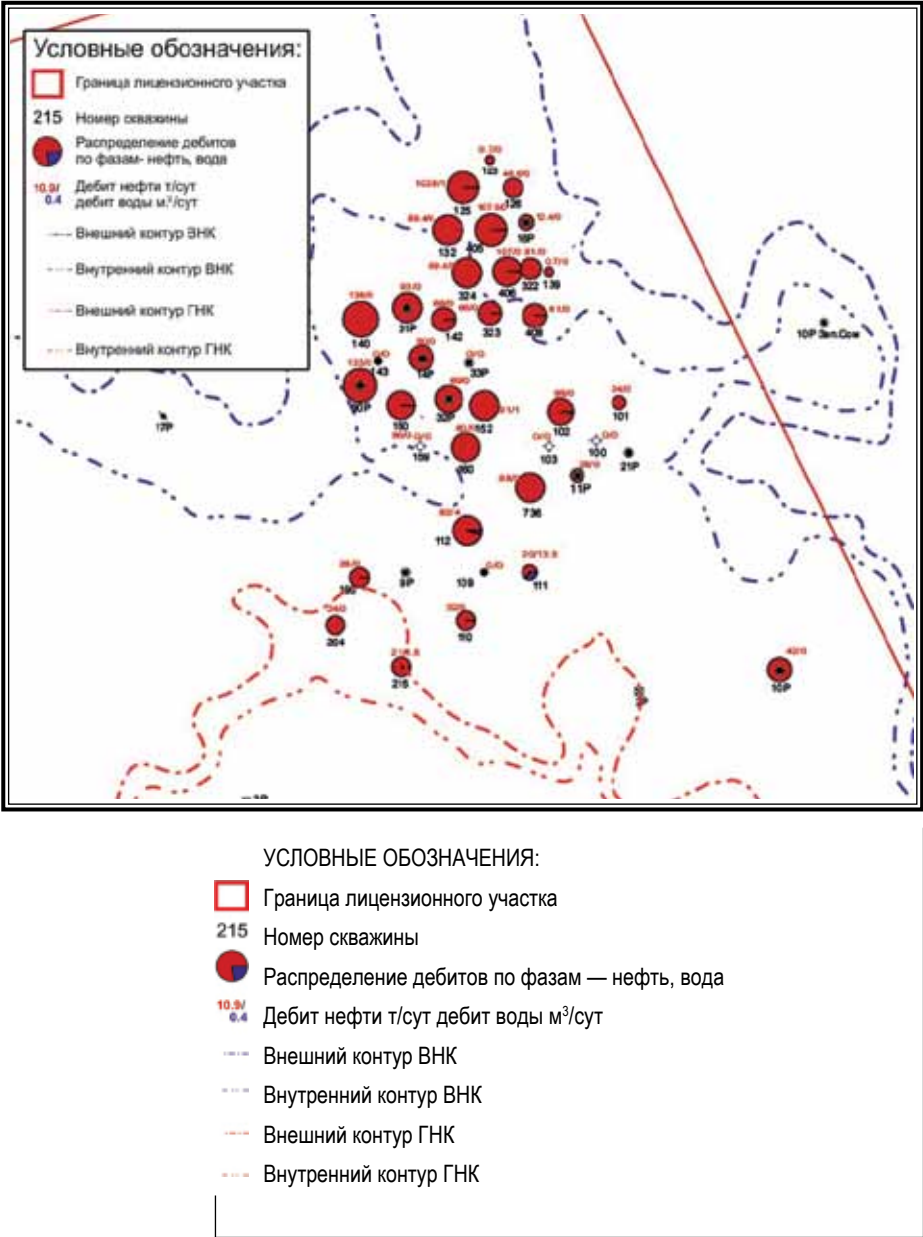


Рисунок 4. Карта текущего состояния разработки.
Объект Ю₁².
Fig. 4. Map of the current state of development.
Object J₁².

вил от 40 до 90 тыс. т. Добыча нефти из этих 18 скважин (28,5 % фонда) на дату анализа 1 074 тыс. т, приблизительно 61 % от всей добычи Месторождения Х. Данные 18 скважин с высоким дебитом (5 скв. – $Ю_1^1$, 12 скв. – $Ю_1^2$, 1 скв. – совместно $Ю_1^1$ и $Ю_1^2$) оказывают определяющее влияние на динамику технологических показателей разработки месторождения.

По типу профиля практически весь эксплуатационный фонд скважин является наклонно-направленным, было пробурено лишь шесть скважин с горизонтальным окончанием длиной 700 м. По мнению авторов, разработка нефтяных залежей с низкими фильтрационными свойствами, с газовой шапкой и подстилаемых водой оптимальна системой горизонтальных скважин [18].

Единственным применённым на месторождении методом интенсификации добычи является гидроразрыв пласта. Всего было проведено семь операций на скважинах в северной части объекта $Ю_1^2$. Величина прироста дебита нефти после операции составила от 35 до 121 т/сут., величина снижения значения скин-фактора – до минус 4,9. Во всех мероприятиях использовалась масса пропанта около 40 тонн.

На начало 2012 года месторождение Х находилось на начальном этапе разработки, отбор от НИЗ по объектам $Ю_1^1$ и $Ю_1^2$ составлял 7,7 и 3,6 %, соответственно, система разработки не сформирована, газоконденсатные объекты не введены в эксплуатацию [13, 14].

В ходе проведения опытно-промышленной разработки и дальнейшей эксплуатации объектов на месторождении были получены начальные притоки безводной нефти, что отмечается и по состоянию на 01.01.2012 г., текущая обводненность составляет лишь 1 %.

Несмотря на низкие коллекторские свойства пластов юрских отложений входные дебиты скважин являются высокими даже без применения гидроразрыва пласта ввиду уникальных свойств пластовых флюидов, характеризующихся сверхнизкой вязкостью и, соответственно, высокой подвижностью [4]. Единственным участком, на котором гидроразрыв пласта был применён с целью получения промышленного притока флюида, является северный участок объекта $Ю_1^2$ вблизи внешнего контура ГНК. Успешность мероприятий составила 100 %, что позволяет рекомендовать гидроразрыв пла-

та в качестве перспективного вида мероприятий по интенсификации притока на месторождении X [12]. Подбор скважин кандидатов и выбор технологии для проведения ГРП должен осуществляется таким образом, чтобы не допустить прорыва по трещинам ГРП подошвенных вод и газа из газовой шапки пласта Ю₁² [1, 3, 5, 10, 11].

Неблагоприятные факторы с точки зрения разработки месторождения были выявлены в ходе анализа динамики изменения пластового давления. Оба введенных в разработку объекта характеризуются начальным пластовым давлением близким к давлению насыщения. На месторождении был проведен ряд исследований для определения влияния снижения пластового давления на процесс добычи углеводородного сырья.

Исследования КВД проведены на 13 поисково-разведочных скважинах пласта Ю₁¹ и на шести скважинах Ю₁². Полученные данные свидетельствуют о том, что в процессе эксплуатации происходит интенсивное снижение пластового давления в зоне отбора [8, 15]. Текущее пластовое давление по группе скважин уже ниже давления насыщения, что сопровождается снижением продуктивности скважины (вплоть до 20 %) от начальной и увеличением скин-фактора (до плюс 11). Данные изменения являются необратимыми и наиболее сильно проявляются на объекте Ю₁¹.

В рамках ОПР для поддержания пластового давления был выполнен перевод под закачку трех скважин с оптимальным забойным давлением. В то же время эксплуатацию одного элемента системы запланировано производить без поддержания пластового давления с целью оценки собственных энергетических возможностей залежи. Введение нагнетательных скважин и ограничение добычи в районах с наиболее длительным периодом разработки позволило стабилизировать пластовое давление, а на отдельных участках даже привело к его росту.

Результаты пробной эксплуатации ещё раз показали проблемы, возникающие при эксплуатации сложных по геологическому строению и флюидальному составу объектов. Для оптимизации разработки данных залежей рекомендуются следующие основные проектные решения:

- 1) формирование с начала эксплуатации системы поддержания пластового давления:

- 2) бурение скважин с горизонтальным окончанием, что позволит при использовании щадящих депрессий на пласт обеспечить рентабельные дебиты и не допустить быстрый прорыв газа и воды к скважине [7, 17];
- 3) необходимо предусмотреть адресную программу ГТМ как при вводе скважин в эксплуатацию (ГРП) [16], так и при дальнейшей эксплуатации (изоляционные, физико-химические методы) [19];
- 4) при обводнении скважин рекомендуется обработка призабойной зоны составом Адинол-20, позволяющим снизить обводнённость продукции добывающих скважин [2, 20, 6].

Выводы

На месторождении X в разработку введены объекты Ю₁¹ и Ю₁², включающие нефтяную и нефтяную залежь с газовой шапкой, соответственно. Газоконденсатные объектные не эксплуатируются. По обоим объектам система разработки не сформирована, реализованы только отдельные элементы.

При изучении залежи пласта Ю₁¹ её критическое фазовое состояние не позволило однозначно идентифицировать тип залежи. На текущий момент нефть данной залежи охарактеризована как «летучая».

Для пласта Ю₁¹ по проектному документу реализуется обращенная семиточечная система поддержания пластового давления с размещением скважин по треугольной сетке с шагом 700 м. На объекте Ю₁² – трехрядная система разработки 700 × 700 м.

Несмотря на низкие фильтрационно-ёмкостные свойств коллекторов входные дебиты скважин высокие, что объясняется свойствами флюидов месторождения X. Большая часть фонда эксплуатируется фонтанным способом.

Проведение гидроразрыва пласта зарекомендовало себя как эффективный метод интенсификации притока в условиях месторождения X.

Пластовое давление разрабатываемых объектов близко к давлению насыщения. В ходе проведения исследований выявлено не-

обратимое негативное влияние снижения пластового давления ниже давления насыщения на продуктивность скважин.

Отмечается рост газового фактора даже при незначительном снижении пластового давления, особенно на пласте Ю₁¹.

Ввод нагнетательных скважин позволил стабилизировать пластовое давление, но основные проблемы разработки данных сложных объектов остаются нерешенными. Для оптимизации дальнейшей эксплуатации данных залежей необходима комплексная реализация предлагаемых проектных решений.

Библиографический список

1. Астафьев В.И., Федорченко Г.Д. Асимптотический анализ процесса развития трещины ГРП // Математическое моделирование и краевые задачи. 2010. № 1. С. 32–36.
2. Ваганов Е.В., Сохошко С.К., Саранча А.В. и др. Результаты ликвидации притоков воды в скважинах, дренирующих газоконденсатные залежи // Наука. Инновации. Технологии. 2022. № 2. С. 7–24.
3. Вагнер А.М., Телишев А.А. Анализ проведения ГРП на примере месторождений Ноябрьского района // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 1997. № 6. С. 80.
4. Гончаров И.В., Обласов Н.В., Сметанин А.В., Журова Е.Л., Воронков А.А. Оценка фазового состояния залежи одного из месторождений углеводородов Томской области // Горный журнал. 2012. № 4. С. 21–32.
5. Дружинская Ю.А. Применение комплекса исследований для определения геометрии трещин ГРП на месторождениях ОАО "Сургутнефтегаз" // Научный обозреватель. 2017. № 7. С. 48–50.
6. Земцов Ю.В., Баранов А.В., Гордеев А.О. Обзор физико-химических МУН, применяемых в Западной Сибири, и эффективности их использования в различных геолого-физических условиях // Нефть. Газ. Новации. 2015. № 7. С. 11–21.
7. Казаков И.М. Заканчивание скважин – важнейший этап в их строительстве // Бурение и нефть. 2021. № 1. С. 55–56.
8. Казетов С.И., Исмагилов С.Ф. Прогнозирование индикаторных диаграмм на базе модификации формулы Вогеля // Булатовские чтения. 2019. № 2. С. 97–100.

9. Классификация запасов и ресурсов нефти и горючих газов. Нормативно-методическая документация. М.: ЕСО-ЭН, 2016. 320 с.
10. Логинов А.В., Колесник В.П. Прогноз продуктивности скважин после проведения ГРП и геометрия трещин разрыва // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегагабассейна (опыт, инновации). 2012. № 1. С. 193–196.
11. Мастриков А.В. Определение параметров трещины ГРП из кривой падения давления, полученной при мини-ГРП // Форум молодых учёных. 2018. № 12–3. С. 242–248.
12. Меледин А.С. Методика обоснования скважин для многостадийного гидроразрыва пласта на примере юрских отложений Западной Сибири // Проблемы геологии и освоения недр. 2016. С. 363–364.
13. Мулявин С.Ф., Маслов В.Н. Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири. Монография в двух частях. Часть I. Тюмень: ТИУ, 2016. 268 с.
14. Мулявин С.Ф., Маслов В.Н. Геология и разработка нефтяных и газовых месторождений Западной Сибири. Монография в двух частях. Часть II. Тюмень: ТИУ, 2016. 150 с.
15. Поплыгин В.В., Поплыгина И.С. Изменение продуктивности скважин в бобриковских терригенных отложениях месторождений верхнего прикамья при высокой газонасыщенности пластовой нефти // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2012. № 5. С. 63–69.
16. Сабитов Р.Р., Швечиков К.Д. Модель принятия решений на основе линейной регрессии для планирования ГРП объекта ЮВ1 Нивагальского месторождения // Территория нефтегаз. 2014. № 5. С. 88–91.
17. Соколов И.С., Павлов М.С., Босых О.Н. Опыт разработки низкопроницаемого пласта горизонтальными скважинами с многостадийным гидроразрывом // Нефтепромысловое дело. 2020. № 7. С. 10–16.
18. Технологическая схема разработки X нефтегазоконденсатного месторождения Томской области по состоянию на 01.01.2012 г.
19. Хлебникова М.Э., Сингизова В.Х., Фахретдинов Р.Н. Анализ литературных и патентных источников по технологиям селективной изоляции воды и ликвидации заколонных перетоков // Интервал. 2003. № 9. С. 4–22.

References

1. Astafiev V.I., Fedorchenko G.D. Asymptotic analysis of the hydraulic fracture development process. Mathematical modeling and boundary value problems. 2010. No. 1. P. 32–36. (In Russ.).
2. Vaganov E.V., Sokhoshko S.K., Sarancha A.V. et al. Results of the elimination of water inflows in wells draining gas condensate deposits. Nauka. Innovation. Technologies. 2022. No. 2. P. 7–24.
3. Wagner A.M., Telishev A.A. Analysis of hydraulic fracturing on the example of fields in the Noyabrsk region. News of higher educational institutions. Oil and gas. 1997. No. 6. P. 80. (In Russ.).
4. Goncharov I.V., Oblasov N.V., Smetanin A.V., Zhurova E.L., Voronkov A.A. Assessment of the phase state of one of the hydrocarbon deposits in the Tomsk region. Mining journal. 2012. No. 4. P. 21–32. (In Russ.).
5. Druzhinskaya Yu. A. Application of a set of studies to determine the geometry of hydraulic fractures in the fields of "Surgutneftegas". Scientific observer. 2017. No. 7. P. 48–50. (In Russ.).
6. Zemtsov Yu. V., Baranov A.V., Gordeev A.O. Review of physicochemical EOR methods used in Western Siberia and the effectiveness of their use in various geological and physical conditions. Neft. Gas. Innovations. 2015. No. 7. P. 11–21.
7. Kazakov IM Completion of wells – the most important stage in their construction. Drilling and oil. 2021. No. 1. P. 55–56. (In Russ.).
8. Kazetov S.I., Ismagilov S.F. Forecasting of indicator diagrams based on the modification of the Vogel formula. Bulatov readings. 2019. No. 2. P. 97–100. (In Russ.).
9. Classification of reserves and resources of oil and combustible gases. Regulatory and methodological documentation. Moscow: ESOEN Publ. 2016. 320 p.
10. Loginov A.V., Kolesnik V.P. Well productivity forecast after hydraulic fracturing and fracture geometry. Geology and oil and gas potential of the West Siberian megabasin (experience, innovations). 2012. No. 1. P. 193–196. (In Russ.).
11. Mastrikov A.V. Determination of hydraulic fracture parameters from the pressure drop curve obtained during mini-hydraulic fracturing. Forum of young scientists. 2018. No. 12–3. P. 242–248. (In Russ.).

12. Meledin A. Methodology of substantiation of wells for multi-stage hydraulic fracturing on the example of Jurassic deposits of Western Siberia. Problems of geology and subsoil development. 2016. P. 363–364. (In Russ.).
13. Mulyavin S.F., Maslov V.N. Geology and development of oil and gas fields in Western Siberia. Monograph in two parts. Part I. Tyumen: TIU Publ., 2016. 268 p. (In Russ.).
14. Mulyavin S.F., Maslov V.N. Geology and development of oil and gas fields in Western Siberia. Monograph in two parts. Part II. Tyumen: TIU Publ., 2016. 150 p. (In Russ.).
15. Poplygin V.V., Poplygina I.S. Change in well productivity in Bobrikovsk terrigenous deposits of the upper Kama area with high gas saturation of reservoir oil. Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining. 2012. No. 5. P. 63–69. (In Russ.).
16. Sabitov R.R., Shvechikov K.D. Decision-making model based on linear regression for planning hydraulic fracturing of the YuV1 facility of the Nivagalskoye field. Territory of oil and gas. 2014. No. 5. P. 88–91. (In Russ.).
17. Sokolov I.S., Pavlov M.S., Bosykh O.N. Experience in the development of a low-permeability formation with horizontal wells with multistage hydraulic fracturing. Oilfield business. 2020. No. 7. P. 10–16. (In Russ.).
18. Technological scheme for the development of the X oil and gas condensate field in the Tomsk region as of 01.01.2012. (In Russ.).
19. Khlebnikova M.E., Singizova V. Kh., Fakhretdinov R.N. Analysis of literary and patent sources on technologies of selective water isolation and elimination of behind-the-casing flows. Interval. 2003. No. 9. P. 4–22. (In Russ.).

**Статья поступила в редакцию 13.01.2023,
статья одобрена после рецензирования 25.05.2023,
статья принята к публикации 26.08.2023.**

**The article was submitted to the editorial office 13.01.2023,
the article was approved after reviewing 25.05.2023,
the article was accepted for publication 26.08.2023.**

Информация об авторах

Мулявин Семён Фёдорович, доктор технических наук, профессор кафедры РЭНГМ института геологии и нефтегазодобычи Тюменского индустриального университета.
E-mail: msf-052@mail.ru.

Бяков Александр Витальевич, начальник отдела разработки нефтяных и газовых месторождений, «ГЕОДАТА».
E-mail: Byakov@mnp.geodata.ru.

Нещадимов Роман Александрович, аспирант, Тюменский индустриальный университет.
E-mail: NeshchadimovRA@yandex.ru.

Information about the authors

Semyon F. Mulyavin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of RENGМ of the Institute of Geology and Oil and Gas Production of Tyumen Industrial University.
E-mail: msf-052@mail.ru.

Aleksandr V. Byakov, Head of Oil and Gas Fields Development Department, LLC MNP GEODATA.
E-mail: Byakov@mnp.geodata.ru

Roman A. Neschadimov, Graduate Student, Tyumen Industrial University.
E-mail: NeshchadimovRA@yandex.ru.



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

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

Подписано в печать 15.09.2023 г. Выход в свет 27.09.2023 г.
Формат 70 × 108 1/16. Гарнитура Times New Roman. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 20,65 Тираж 1000 экз. Цена 534 руб.

Отпечатано в дизайн-бюро Высшей школы креативных индустрий ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». 355029, г. Ставрополь, пр-т Кулакова, 2.