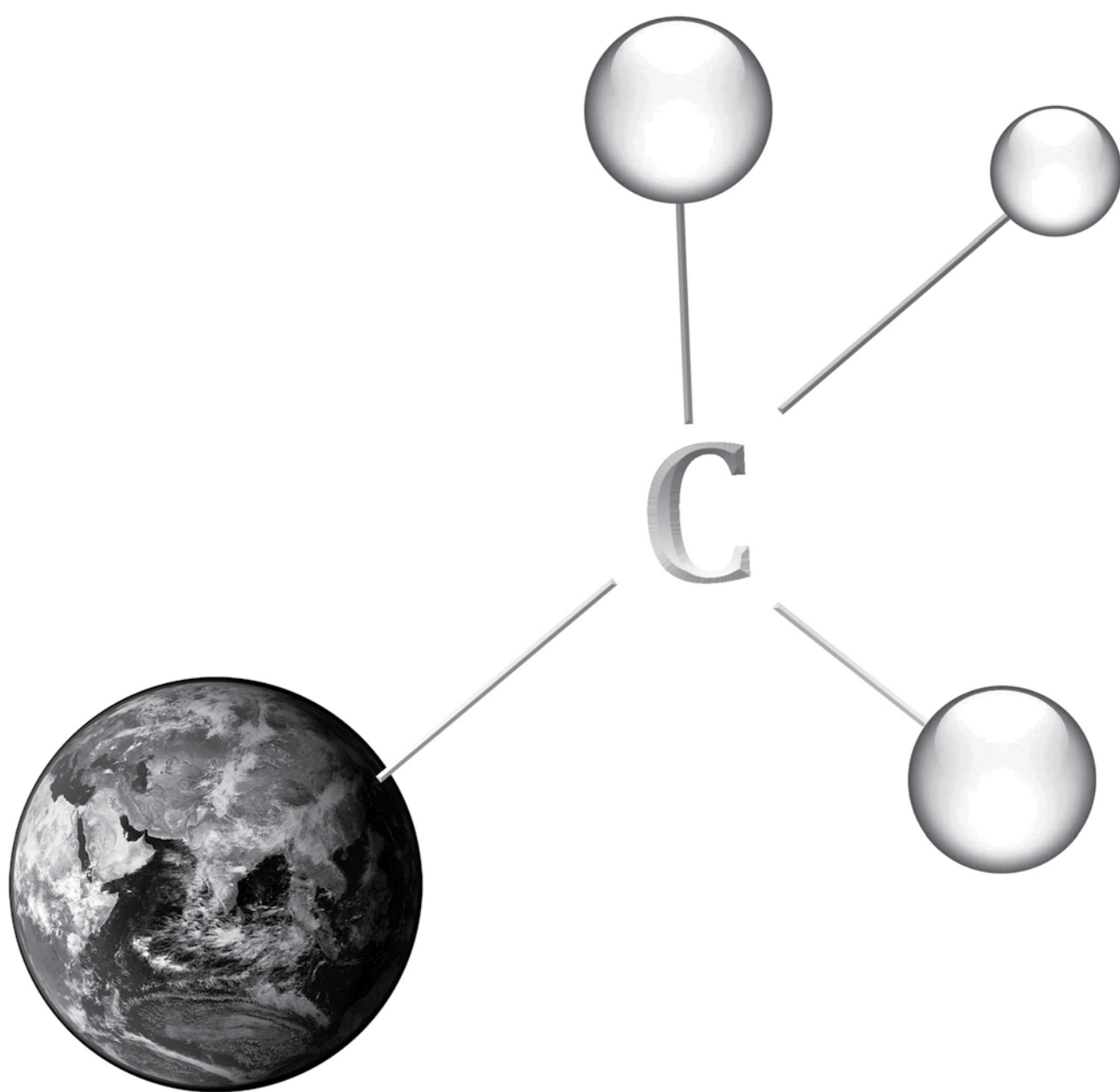


НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2076-7358

МОНИТОРИНГ

наука и технологии



№ 2(68) 2026

«МОНИТОРИНГ. НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

*Журнал издается при поддержке
Научного совета РАН по проблемам геотермии*

Адрес редакции:

367027, Республика Дагестан,
г. Махачкала, ул. Селивантьева, 2

Телефон гл. редактора: (8-926) 067-59-67

Телефон редакции: (8-928) 962-32-60

Эл. почта редакции: monitoringST@mail.ru

Сайт журнала: www.csmos.ru/mnt

Журнал зарегистрирован в Федеральной
службе по надзору в сфере связи и массовых
коммуникаций. Свидетельство о регистрации
средства массовой информации

ПИ ФС 77-33138

Издается с 2009 г.

Журнал рецензируется.

Выходит 4 раза в год.

Журнал индексируется в базе РИНЦ.

Журнал реферируется в ВИНИТИ РАН.

Журнал включен в Перечень ВАК.

Подписной индекс в каталоге

«Урал-Пресс»: **84650**

Ответственность за достоверность информации,
содержащейся в рекламных материалах, несут
рекламодатели.

Учредитель и издатель:

ООО «Центр сопряженного мониторинга
окружающей среды и природных ресурсов»

Главный редактор

Н.М.Булаева

e-mail: bulaeva_nurjagan@mail.ru

Зам. главного редактора

Г.Г.Петрик

e-mail: galina_petrik@mail.ru

Редакционная коллегия:

Алиев Р.М. д.т.н.

Атаев З.В. к.г.н.

Батугин А.С. д.т.н.

Безруких П.П. д.т.н.

Братков В.В. д.г.н.

Гайрабеков И.Г. д.т.н.

Галаганов О.Н. к.ф.-м.н.

Григорьев Б.А. д.т.н.

Дадашев М.Н. д.т.н.

Демежко Д.Ю. д.г.-м.н.

Дубинин Е.П. д.г.-м.н.

Зуй В.И. д.г.-м.н. – Беларусь

Илюшина Т.В. д.г.н.

Керимов И.А. д.ф.-м.н.

Малинников В.А. д.т.н.

Мелкий В.А. д.т.н.

Минцаев М.Ш. д.т.н.

Мухтаров А.Ш. д.г.-м.н. – Азербайджан

Парфенюк О.И. д.ф.-м.н.

Петров И.В. д.э.н.

Утямышев И.Р. д.т.н.

Федаш А.В. д.т.н.

Хуторской М.Д. д.г.-м.н.

Шихнабиева Т.Ш. д.п.н.

Технический редактор

Гаджиханов А.С.

Компьютерная верстка

Загирова З.Б.

© «Мониторинг. Наука и Технологии», 2026

Номер подписан в печать 25.06.2026 г.

Отпечатано в ООО «ЦСМОСиПР»

Адрес издателя/типографии: 367027, РД, г. Махачкала, ул. Селивантьева, 2

Цена свободная. Тираж 350

Заказ №2

«MONITORING. SCIENCE & TECHNOLOGIES»

SCIENTIFIC & TECHNICAL JOURNAL

Published with the support of

The Scientific Council of the Russian Academy of Sciences for Geothermal Problems

Editorial address:

367027, Republic of Dagestan,
Makhachkala, Selivantiev, 2

Editor-in-chief tel: (8-926) 067-59-67

Office tel: (8-928) 962-32-60

E-mail: monitoringST@mail.ru

Website: www.csmos.ru/mnt

Journal is Registered in Federal Supervision
Agency for Information Technologies and
Communications Certificate of Mass Media
Registration

ПН ФС 77-33138

Published from 2009

Peer-reviewed Journal.

Issued 4 times a year.

*Journal is **Indexed** in the
Russian Index of Scientific Citation.*

*Journal is **Referred** in VINITI
Russian Academy of Sciences.*

**Journal is Included in the List of High Attestation
Commission of Russian Federation.**

*Subscription index in the catalog
of «Ural-Press» is **84650***

*Responsibility for the reliability of information
contained in promotional materials
rests with advertisers.*

Founder and publisher:

LLC «Center of the Conjugated Monitoring of
Environment and Natural Resources»

Editor in Chief

N.M.Bulaeva

e-mail: bulaeva_nurjagan@mail.ru

Deputy Editor in Chief

G.G.Petrik

e-mail: galina_petrik@mail.ru

Editorial Board:

Aliyev R.M. Dr.T.S.

Atayev Z.V. Cand.G.S.

Batugin A.S. Dr.T.S.

Bezrukih P.P. Dr.T.S.

Bratkov V.V. Dr.G.S.

Gairabekov I.G. Dr.T.S.

Galaganov O.N. Cand.P.-M.S.

Grigoryev B.A. Dr.T.S.

Dadashev M.N. Dr.T.S.

Demezhko D.Yu. Dr.G.-M.S.

Dubinin E.P. Dr.G.-M.S.

Zui V.I. Dr.G.-M.S. – Belarus

Ilyushina T.V. Dr.G.S.

Kerimov I.A. Dr.P.-M.S.

Malinnikov V.A. Dr.T.S.

Melkiy V.A. Dr.T.S.

Mintshev M.Sh. Dr.T.S.

Mukhtarov A.Sh. Dr.G.-M.S. – Azerbaijan

Parfenyuk O.I. Dr.P.-M.S.

Petrov I.V. Dr.E.S.

Utyamyshev I.R. Dr.T.S.

Fedash A.V. Dr.T.S.

Khutorskoy M.D. Dr.G.-M.S.

Shikhnaeva T.S. Dr.P.S.

Technical Editor

Gadzhikhanov A.S.

Computer Layout

Zagirova Z.B.

© «Monitoring. Science & Technologies», 2026

Signed for printing 25.06.2026

Printed in Center of the Conjugated Monitoring of Environment and Natural Resources
Address of Publisher/Printing Office: 367027, Republic of Dagestan, Makhachkala, Selivantieva, 2
Price is open. Circulation is 350
Order №2

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. Науки о Земле	6
<i>Джелилов Г.К., Алиев Р.М., Ахмедов Г.Я., Рашидханов А.Т.</i> Технологии предотвращения кольматации при обратной закачке геотермальных вод Махачкала-Тернаирского месторождения Республики Дагестан	6
<i>Павлова В.Ю., Гурьевна Н.О.</i> Развитие методов гидрогеосейсмологического мониторинга в России и за рубежом	12
<i>Асех К.Ф., Беленко В.В.</i> Экспериментальные исследования по практической реализации методики обнаружения изменений состава земель на основе комплекса синтезированных и индексных изображений..	18
<i>Чумарев И.С., Беленко В.В.</i> Анализ целевой аппаратуры КА ДЗЗ из космоса и соответствующих наборов пространственных данных для выявления сельскохозяйственной засухи	28
<i>Саченок Д.А., Туманян К.</i> Обоснование применения комплексов вегетационных индексов для задач экологического мониторинга	39
<i>Алексеев К.С., Ильченко А.А.</i> Геоэкологическая оценка качества атмосферного воздуха г. Сургута: интеграция спутниковых данных Sentinel-5P и метеорологических параметров	45
<i>Данг Тхань Нам, Ознамец В.В.</i> От мониторинга береговой линии к задачам геодезического обеспечения прибрежного кадастра: опыт ряда стран и необходимость для территории Вьетнама	50
<i>Желонкина Е.Э., Ваняев А.В., Лунина Е.Д.</i> Современные подходы ландшафтного благоустройства в городах на примере города Астрахани	59
<i>Мочалов А.В., Алтынов А.Е., Дрыга Д.О.</i> Стереосистема для создания трехмерных моделей для документирования объектов археологического наследия	65
<i>Кузовлев Н.А., Юнусов А.Г.</i> Некоторые аспекты и апробация методики формирования банка геопро пространственных данных геодезического обоснования для землеустройства и кадастров	73
РАЗДЕЛ 2. Технические науки	83
<i>Ганиев Д.Л., Ильин В.К., Хайбуллина А.И.</i> Режимно-статистическое обоснование пылеприготовления и сжигания нефтяного кокса в энергетических котлах	83
<i>Чжан Цзин, Сяо Гуйян, Купцова О.В., Му Яннань.</i> Мониторинг эффективности топливных элементов в гибридных автомобилях с адаптивным энергоменеджментом	89
<i>Чжан Цзин, Бай Цзэцзюй, Купцова О.В.</i> Оптимизация траектории беспилотного наземного транспортного средства	94
РАЗДЕЛ 3. Информационный раздел	103
<i>Магомедов Х.Д., Адилов З.А., Асекова З.О., Гамидова А.М., Мусалаева З.А., Сагателова Е.Ю., Павличенко И.Н., Шахмарданова С.Г.</i> Каталог землетрясений Северо-Восточного Кавказа (территория Дагестана и приграничные зоны) и акватории Среднего Каспия за I квартал 2026 г.	103
Информация о редакционном совете	115
Правила для авторов	117

CONTENTS

SECTION 1. Sciences about Earth	6
<i>Djelilov G.K., Aliev R.M., Akhmedov G.Ya., Rashidkhanov A.T.</i> Technologies for preventing formation plugging during geothermal water reinjection at the Makhachkala-Ternair field, Republic of Dagestan	6
<i>Pavlova V.Yu., Gurievna N.O.</i> Development of hydrogeoseismological monitoring methods in Russia and abroad ..	12
<i>Asseh K.F., Belenko V.V.</i> Experimental research on the practical implementation of methods for detecting changes in land composition based on a complex of synthesized and indexed images	18
<i>Chumarev I.S., Belenko V.V.</i> Analysis of satellite remote sensing instruments and corresponding geospatial datasets for agricultural drought detection	28
<i>Sachenok D.A., Tumanian C.</i> Justification of the use of vegetation index complexes for environmental monitoring tasks	39
<i>Alekseev K.S., Il'chenko A.A.</i> Geocological assessment of atmospheric air quality in Surgut: integration of Sentinel-5P satellite data and meteorological parameters	45
<i>Dang Thanh Nam, Oznamets V.V.</i> From shoreline monitoring to the tasks of geodetic support for coastal cadastre: the experience of several countries and its relevance for Vietnam	50
<i>Zhelonkina E.E., Vanyaev A.V., Lunina E.D.</i> Contemporary approaches to urban landscaping using the example of the city of Astrakhan	59
<i>Mochalov A.V., Altynov A.Y., Dryga D.O.</i> Stereo system for creating three-dimensional models to document archaeological heritage objects	65
<i>Kuzovlev N.A., Yumusov A.G.</i> Some aspects and approval of the methodology for forming a geographical data bank for land management and cadastre	73
SECTION 2. Technical science	83
<i>Ganiyev D.L., Il'in V.K., Khaybullina A.I.</i> Regime-statistical justification of petroleum coke pulverizing and combustion in power boilers	83
<i>Zhang Jing, Xiao Guiyang, Kuptsova O.V., Mu Yannan.</i> Consideration of fuel cell efficiency in hybrid vehicles with adaptive energy management	89
<i>Zhang Jing, Bai Zexu, Kuptsova O.V.</i> Optimization of unmanned ground vehicle trajectory planning based	94
SECTION 3. Information section	103
<i>Magomedov Kh.D., Adilov Z.A., Asekova Z.O., Gamidova A.M., Musalaeva Z.A., Sagatlova E.Yu., Pavlichenko I.N., Shakhmardanova S.G.</i> Catalog of earthquakes of the North-Eastern Caucasus (Dagestan and border areas) and the Middle Caspian for the I quarter of 2026	103
Information about editorial council	115
Rules for authors	117

ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ КОЛЬМАТАЦИИ ПРИ ОБРАТНОЙ ЗАКАЧКЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ВОД МАХАЧКАЛА-ТЕРНАЙРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН

¹Джелилов Г.К., ¹Алиев Р.М., ^{1,2}Ахмедов Г.Я., ¹Рашидханов А.Т.

¹Дагестанский государственный технический университет, 367015, Махачкала, Россия

²Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал ОИВТ РАН,
367030, Махачкала, Россия
e-mail: ganapi@mail.ru

В работе приводятся результаты геологоразведочных данных по скважинам геотермальных вод месторождения Махачкала-Тернаир, которые позволяют оценивать перспективы использования термальных вод на отопление, горячее водоснабжение, а также для теплично-парникового хозяйства. Полученные на скважинах месторождения Махачкала-Тернаир данные можно использовать для решения вопросов поддержания пластового давления, сброса отработанных токсичных термальных вод или их захоронения. Проведенные экспериментальные работы на скважинах месторождения Махачкала-Тернаир показали, что для нагнетания отработанных геотермальных вод необходимо выбирать только материнский пласт, что связано с идентичностью химического состава раствора его воды с раствором закачиваемой воды.

Ключевые слова: геотермальная вода, обратная закачка, градиент температуры, пластовое давление, дебит скважины, кольматация пласта.

TECHNOLOGIES FOR PREVENTING FORMATION PLUGGING DURING GEOTHERMAL WATER REINJECTION AT THE MAKHACHKALA-TERNAIR FIELD, REPUBLIC OF DAGESTAN

¹Djelilov G.K., ¹Aliev R.M., ^{1,2}Akhmedov G.Ya., ¹Rashidkhanov A.T.

¹Dagestan State Technical University, 367015, Makhachkala, Russia

²Institute of Geothermal Problems and Renewable Energy – Branch of the Joint Institute for High
Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 367030, Makhachkala, Russia

This paper presents geological exploration data from geothermal wells at the Makhachkala-Ternair field, enabling an assessment of the prospects for utilizing thermal waters for space heating, hot water supply, and greenhouse operations. The data obtained from the Makhachkala-Ternair wells can be used to address issues regarding reservoir pressure maintenance, as well as the discharge or subsurface disposal of spent, toxic thermal waters. Experimental work conducted on wells at the Makhachkala-Ternair field has demonstrated that only the source formations should be selected for the injection of spent geothermal waters, due to the chemical composition of the formation fluids being identical to that of the injected water.

Keywords: geothermal water, reinjection, temperature gradient, reservoir pressure, well flow rate, formation plugging.

Геотермальная энергетика, основанная на использовании источников горячих подземных вод, имеет широкую перспективу в развитии возобновляемой энергетики как в России, так и во всем мире [1-4,7,10,11], Республика Дагестан обладает значительным геотермальным потенциалом, что обусловлено ее расположением в зоне активного тектонического развития на стыке крупных геологических структур. Махачкала-Тернайрское геотермальное месторождение – одно из первых в стране, где была начата эксплуатация термальных вод. В настоящее время разрабатываются два термоводозабора: Махачкалинский и Тернайрский, расположенные в районе г. Махачкалы. Указанное месторождение характеризуется высокой степенью геолого-гидрогеологической изученности, чему способствовали благоприятные геологические условия для поисков залежей нефти, газа и термальных вод. По геологическим условиям водозаборы относятся к месторождениям пластового типа с относительно

простыми гидрогеотермическими условиями, характеризующимися относительно выдержанными по мощности и литологическому составу водовмещающими пластами, незначительной изменчивостью фильтрационных свойств, относительным постоянством гидрогеотермических и гидрохимических условий. Одним из основных эксплуатационных объектов, с которыми связаны перспективы широкого использования термальных вод является среднемиоценовый водоносный комплекс, в котором выделяются два водоносных горизонта: караганский и чокракский. Пластовые давления в них позволяют осуществлять многолетнюю фонтанную эксплуатацию, что отвечает всем требованиям для многоцелевого их использования в различных областях народного хозяйства.

В течение длительного времени здесь в значительных объемах проводились геолого-поисковые работы, включающие геологическую съемку, сейсморазведку, гравиметрию, геотермическую съемку,

структурное, глубокое поисково-разведочное эксплуатационное бурение на нефть и теплоэнергетические воды. На месторождении на миоценовые нефтеносные отложения было пробурено 143 разведочные и эксплуатационные скважины. Начиная с 1950-х годов в пределах месторождения проводились геологоразведочные работы, направленные на решение проблемы освоения геотермальных ресурсов.

В последующем (1968-1975 гг.) с целью разведки палеогеновых и меловых отложений были пробурены скважины глубиной до 4000 м в количестве 15 скважин. В процессе разведки на нефть было установлено наличие горячих вод в песчаных отложениях караганского и чокракского горизонтов.

Специализированные работы по поискам и разведке геотермальных вод на Махачкалинской и смежной Тернаирской площадях были начаты еще в 1964 году. На I этапе они осуществлялись Северо-Кавказской разведочной экспедицией, переименованной позднее в Северо-Кавказское управление разведочного бурения (СКУРБ) министерства газовой промышленности. В значительных объемах проведены работы и по реконструкции ликвидированного фонда нефтяных скважин на термальные воды. Всего за период с 1964 по 1970 годы было реконструировано 34 скважины и пробурено 10 разведочных скважин на площади Махачкала.

Проблемы поддержания пластового давления (ППД), сброса отработанных токсичных термальных вод и захоронения промстоков на сегодня, когда происходит интенсификация освоения месторождений термальных вод и интенсивный рост отходов промышленности, стали самыми активными [5,6,8,9].

Так как термальные воды скважин (пробуренных на Тернаирской площади) характеризуются повышенной минерализацией и содержанием фенолов в настоящее время для утилизации предусматриваются закачки отработанных вод обратно в материнские пласты. В 1989 году на Тернаирской площади были проведены опытно-экспериментальные нагнетания термальной воды по ранее пробуренным на тот же чокракский горизонт 5-ти скважинам №28т, 32т, 36т, 38т, 39т. Целью этих работ было обоснования возможности создания системы обратной закачки в промышленных масштабах и соблюдения правил охраны окружающей среды. Опытные закачки термальных вод осуществлялись тематической партией по программе и новой методике гидрогеологических исследований геотермальных скважин при изучении водопроницаемости продуктивных пластов – «Методика многоступенчатых постепенных нагрузок (ММПН)», разработанной и внедренной в производство управлением «Дагбургеотермия» еще в 1983г. на Избербашском месторождении термальных вод. В методике удачно сочетаются техно-

логические принципы принудительной насосной закачки воды и естественной самоциркуляционной гидродинамической системы, основанной на эффекте термолифта. Указанные работы (по закачкам) проведены для определения приемистости пластов «В2», «В3» свиты «В» чокракского горизонта и возможных ее изменений во времени при длительном режиме нагнетаний, соответствующим эксплуатационным условиям.

По характеру водовмещающих отложений термоводоносные пласты свиты «В» являются поровыми. Обводненность свиты «В» изучена на площади Тернаир достаточно хорошо, а разгрузка водоносных пластов по мнению ряда исследователей осуществляется в Каспийское море. Полученные результаты разведки позволяют высоко оценивать перспективы использования термальных вод с помощью теплообменников не только для отопления, горячего водоснабжения, но и для теплично-парникового хозяйства (ТПХ) в пределах Тернаирской площади. Так как температура сбросной термальной воды равна 60 °С и содержит фенолы, то ее опасно сбрасывать в наземные водоемы на территории месторождения. После использования эту воду необходимо закачивать в материнские пласты. В 1989 году в этом направлении гидропартией управления были проведены экспериментальные работы на площади Тернаир. Были подготовлены три куста скважин по самоциркуляционной системе (СЦС):

I-ый куст – скв. 36т и скв. 28т (вода поступала в скважину 28т из скв. 36т и обратно);

II-ой куст – скв. 32т и скв. 39т (вода поступала в скв. 39т из скв. 32т);

III-й куст – скв. 38т и скв. 28т (вода поступала в скв. 28т из скв. 38т).

В осенне-летний период 1989 года в течение 4-х месяцев на Тернаирской площади геотермальных вод осуществлялись опытные закачки высокоминерализованных фенолосодержащих вод без включения насосов на режимах самоциркуляции, которыми были задействованы 5 скважин (№36 тнэ, 38 тн, 28 тнэ, 39 тн и 32 тэ), где устья эксплуатационных и нагнетательных скважин, пробуренных на один и тот же чокракский водоносный горизонт, герметично соединены между собой.

Для организации круглосуточных наблюдений за процессами нагнетаний при управлении «Дагбургеотермия» была создана исследовательская группа из 4-х человек со спецмашиной, а контроль и текущую обработку полевых материалов и своевременную корректировку режимов нагнетаний производил гидрогеолог тематической партии управления.

Опытные нагнетания проводились с целью получения данных, характеризующих: приемистость скважин и изменения ее во времени; оптимальные давления нагнетания; скорость и направления перемещения фронта холодных вод, физико-химические

процессы, происходящие в системе – закачиваемая вода – пластовые воды – вмещающие породы; надежность водоупоров в кровле и в подошве пласта.

Выбор скважин по группам взаимодействия (эксплуатационная и нагнетательная) обосновывали, во-первых, разницей статических уровней, во-вторых, в них вскрыты одни и те же песчаные пласты (свита «В» пл. «В2», «В3») чокракских отложений, содержащих идентичную термальную воду, в третьих устья этих скважин расположены на небольшом расстоянии друг от друга и почти на одном гипсометрическом уровне.

До начала опытных нагнетаний скважины № 28тэ, 36тэ и наблюдательные скважины №31т, 27т, 38т (свита «В» пл. «В2») и 39т, 32т, 30т (свита «В» пл. «В3») были закрыты на восстановление давления до статического значения после окончания отопительного сезона. Затем по всем скважинам был снят фон давления и в процессе опыта систематически фиксировались все изменения давления как в центральных, так и наблюдательных скважинах.

Первый и самый продолжительный куст закачек проводился в период с 25.07 по 25.08.89 г. и состоял из скважины №28т (возмущающая с гипсометрическим уровнем – 13.2м) и скважины №36т (реагирующая – нагнетательная с гипсометрическим уровнем – 16.2 м, пробуренных на один и тот же чокракский горизонт (но с разными пластами «В2» и «В3»), герметично соединенных между собой, образуя единую замкнутую гидродинамическую систему. Опытные нагнетания проведены на 3-х режимах (на штуцерах с 15, 30, 50мм) без подключения насоса, по естественной, самоциркуляционной гидродинамической системе (СЦС) за счет превышения динамического уровня и существующего термолифта на скважине №28т (вода через фильтр свободно поступала в скважину №36т и далее в призабойную зону пласта). Термальная вода в результате выпусков из скв. №28тэ подавалась по замкнутому трубопроводу с попутным отделением газа от воды (сепарированием) с помощью вертикального нефтегазо-сепаратора типа «УПС» – 3000/16М и далее через фильтр, установленный на линии перед байпасом с водомерным счетчиком СГИ-04 свободно поступает в призабойную зону пласта скв. №36тн. В скважину №36тн закачено (самотеком) 17440м³/сут. термальной фенолосодержащей воды. За период с 17 по 19.08.89 г. в течение II-го режима работы скважины №36т произведена запись 3х кривых термограмм по стволу скважины трестом «Грознефтегеофизика».

Самоциркуляционная геотермальная система скважин №28т – №36т и результаты закачки приведены в граф. П. 10-11, табл. 1.

Первый же опытный куст закачек был возобновлен и состоял из тех же скважин в период с 22.09 по 02.10.89 г., но роль взаимодействующих скважин поменялась.

Таким образом, термальная вода в результате выпусков проводимых из скважины №36т подавалась по замкнутому трубопроводу к скважине №28т за счет создаваемого термолифта на возмущающей скважине №36т и далее в призабойную зону пласта. Первые 3 часа закачки велись принудительно с помощью насосной установки ЦНС-60-330 и до окончания опытных нагнетаний по естественной самоциркуляционной гидродинамической системе на 2-х режимах нагнетания при диаметрах штуцеров – 20мм, 40мм. Продолжительность закачек составила 239 часов.

Второй куст пробных закачек проводился в период с 6 по 13.09.89 г. и состоял из скважин №28тэ и №38тн, герметично соединенных между собой, образуя единую замкнутую гидродинамическую систему. Пробные нагнетания проводились с периодическим подключением насосной установки ЦНС 60-330, а режимы нагнетаний регулировались задвижкой на устье и на нагнетательной линии в скважину №38т.

Термальная вода в результате выпусков из скважин №28тэ подавалась через насосную установку в действующий коллектор с холодной пресной проточной водой, в котором проложена линия НКТ с диаметром 73мм (длина линии НКТ составляла 200 м) с целью охлаждения подаваемой термальной воды и далее в призабойную зону пласта скважины №38т. Второй опытный куст закачек был возобновлен в обратной последовательности и проводился в период с 10.10 по 2.11.89 г. и задействовал скважины № 38т (эксплуатационная) и №28т (нагнетательная), которые объединены в замкнутую гидродинамическую систему. Опытные нагнетания проводились на 3-х режимах без подключения насосной установки за счет превышения динамического уровня и существующего термолифта на скважине №38т (вода через охладительный коллектор с проточной водой и фильтр-отстойник на байпасе свободно поступает в скважину №28т и далее в призабойную зону пласта). Режимы нагнетаний регулировались штуцерами с диаметром 30, 40, 63 мм.

Третий опытный куст закачек проводился в период с 6 по 20.10.1989 г. и были задействованы скважины №32т (эксплуатационная) и №39т (нагнетательная), герметично соединенных между собой, образуя единую замкнутую гидродинамическую систему. Опытные нагнетания проводились на 4-х режимах и каждый режим регулировался штуцерами с диаметром 20, 30, 40 мм. Схема закачек не позволила проводить опытные нагнетания с подключением насосной установки, которая находилась на большом удалении от обеих взаимодействующих скважин. Поэтому опытные работы велись на режимах самоциркуляции за счет создаваемого термолифта при помощи выпусков воды на устье скважины №32тэ.

Результаты опытных работ (выпуски и нагнетания)
по скважинам Махачкала-Тернаирского месторождения

№№ п/п	№ скважины горизонт, интервал перфорации, м	Результаты испытаний (выпусков)								Коэф-т продуктив- ности, м³/сут. атм				
		Дата продолжитель- ность, в сут. (час)	Статическое давление, атм.		Дебит, м³/сут. д шт.	Динамическое давление, атм.		Температура, °С						
			Р уст.	Р пл.		Р уст.	Р заб.	Т уст.	Т заб. Тпл.					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				
1.	28г чокрак св. «В» пл. «В₂» 1900-1850	18-19.06.75г.	13,1	196,8	2640	11,2	194,2	99	102,5	1015,4				
		1 (24)			30									
		19-20.06.75г.			4000				7,2		192,8	99,5	103	1000
		1 (24)			50									
		20-21.06.75г.			4420				3,2		191,9	100	103	902
		1 (24)			св.излив									
28.06-10.07.75г.	4300	3,3	192,2	99,5	—	935								
11.616 (278,8)			100											
2.	36г чокрак св.«В» пл.«В₃» перфориров. 1956-1966 (1966-1973) открытый ствол	06-07.08.86г.	9,5	208	1200	11,0	199,83	97	—	146,87				
		0,916 (22)			40									
		07-08.08.86г.			1450				12,0		200,65	96	—	195,95
		1,0416 (25)			30									
		08-09.08.86г.			450				14,08		204,16	85	—	117,18
		1.01875 (24,45)			15									
3.	39г чокрак св.«В» пл«В₃», 2062-2040 2030-2022 2002-1992	21-22.09.89г.	9,5	209	1149	3,9	199,29	75	—	118,33				
		1,125 (27)			30									
		25-26.09.89г.			1439				2,5		197,71	80,5	103	127,46
		0,875 (21)			40									
		26-28.09.89г.			1630				1,5		196,48	84	130,19	
		1,95875 (47)			50									
		28-29.09.89г.			1763				1,4		196,85		138,27	
		1,25 (30)			100									

№№ п/п	№ скважины горизонт, интервал перфорации, м	Водо- проводим- ость, м²/сут.	Коефф-т пьеэпро- водности, м³/сут.атм	Результаты нагнетаний							
				Дата продолжительность, в сут. (час)	Статическое давление перед нагнетанием, атм.		Дебит, м³/сут. д шт.	Давление на устье, атм.	Температура, °С		Коефф-т приемисто- сти, м³/сут. атм.
					Р уст.	Р пл.			Туст.	Тзаб.	
1	2	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1.	28г чокрак св.«В» пл.«В₂» 1900-1850	248	38,92x10 ⁵	22.09-02.10.89г. 9,96 (239,20) 10-17.10.89г. 5,66 (135,90) 17-20.10.89г. 2,78 (65,60) 20-31.10.89г. 10,77 (258,55)	9,4	196,8	338,8 20 460 30 465 40 330 63	10,0 10,8 10,7 12,5	60 52 45 44	104	565 330 360 106
2.	36г чокрак св.«В» пл.«В₃» перфориров. 1956- 1966 (1966-1973) открытый ствол	26,70	23,41x10 ⁵	25-27.07.89г. 2,25 (54) 31.07-10.08.89г. 10,10 (242,50) 10-17.08.89г. 6,89 (165,4) 22-25.08.89г. 3,27 (78,45)	9,5	208	595,8 15 557 15 664,4 30 820,5 св.излив	12,0 12,0 12,4 12,5	82 83 86 89	104	240 220 230 270
3.	39г чокрак св.«В» пл.«В₃» 2062-2040 2030-2022 2002-1992	70,71	12,78x10 ⁵	06-11.10.89г. 4,77 (114,5) 11-13.10.89г. 1,854 (44,50) 13-17.10.89г. 3,804 (91,3) 17-20.10.89г. 2,006 (48,15)	9,5	209	210 30 43,0 40 32,0 20 42,0 30	10,56 10,24 10,24 9,9	60 42 33 27	103	200 60 40 100

Самоциркуляционная геотермальная система скважин и результаты опытных работ по скважинам Махачкала-Тернаирского месторождения представлены в таблице. Следует отметить, что на всех режимах выполненных опытных нагнетаний невольно были выбраны наихудшие условия (без снятия теплового потенциала, т.е. без потребителя с определенным запасом «прочности»).

По результатам проведенных работ (нагнетаний) можно сделать выводы:

1. Скважины №28г, 36г, 39г можно использовать как нагнетательные, а скважину №38г как добычную. При этом получены такие параметры:

- коэффициент приемистости скважины – 200-560 м³/сут.атм.;
- при давлениях нагнетания – 0.6-3.2атм;

– при температуре закачиваемой воды на устье – 44-89°C.

2. Ориентировочно могут принимать термальную воду:

– скважина №28т – до 500 м³/сут. при давлениях нагнетания – 1.3 атм.;

– скважина №36т – до 800 м³/сут. при давлениях нагнетания – 3.0 атм.;

– скважина №39т – до 200 м³/сут. при давлениях нагнетания – 1.0 атм. при нормальной подготовке оборудования устьев скважин и закачиваемой воды.

Скважина №38т не принимает из-за технического несоответствия призабойной части ствола скважины для опытных закачек.

3. При проведении закачек воды с температурой ниже 40-60°C фильтрационные параметры пластов ухудшаются в соответствии с увеличением вязкости воды по сравнению с пластовой.

4. Необходимо для нагнетаний выбирать только материнские пласты.

5. В настоящее время эти воды могут быть использованы в народном хозяйстве только по 2-х контурной системе с применением коррозионно-стойкого оборудования и внедрением ГЦС.

Для обоснования возможности и экономической целесообразности создания геотермальной циркуляционной системы (при наличии потребителей) на флангах Тернаирской площади необходимо, кроме скважин №43т, 45т пробурить (недалеко от них) на

термальную воду еще минимум одну скважину – как наблюдательную, так как указанные скважины находятся от основных очень далеко (около 3-х километров). Далее необходимо выполнить большой объем продолжительных опытных работ (температурные, геофизические, гидродинамические и технико-экономические расчеты) для составления проекта разработки Махачкала-Тернаирского геотермального месторождения с целью теплоснабжения и горячего водоснабжения г. Махачкала. Для решения этих задач необходимо выполнить специальные работы (опытные, продолжительные опытно-промышленные выпуски, нагнетания и систематические наблюдения) на разведочных, эксплуатационных и наблюдательных скважинах чокракского комплекса с изучением процессов коррозии и солеотложений, выполнением как сокращенных, так и полных химических анализов термальной воды.

В результате проведенных работ должны быть получены исходные параметры к пересчету эксплуатационных запасов термальных вод для обеспечения потребности города в количестве 18 тыс.м³/сут. и должен быть решен вопрос о внедрении ГЦС. Путем создания ГЦС можно рассмотреть не только возможность приращения запасов термальных вод всего месторождения, но и поддержание пластового давления (ППД), охраняя окружающую среду от вредного влияния фенолосодержащих токсичных вод.

Список литературы

1. Курбанов М.К. Гидротермальные и гидроминеральные ресурсы Северного Кавказа и Предкавказья. Москва: Наука. 2001. 277 с.
2. Бадавов Г.Б. Достижения и перспективы развития геотермального производства в Республике Дагестан // Малая энергетика. 2013. №1-2. С. 98-101.
3. Бутузов В.А., Алхасов А.Б., Алиев Р.М., Бадавов Г.Б. Геотермия Дагестана: месторождения, технологии, эксплуатация // Окружающая среда и энергоснабжение (ОСЭ). 2021. №2. С. 4-20.
4. Алхасов А.Б. Технология комплексного освоения геотермальных ресурсов Северо-Кавказского региона // Теплоэнергетика. 2018. №3. С. 31-34.
5. К вопросу утилизации отработанных геотермальных вод. Чалаев Д.Р., Очаков В.В. // Геотермальная бюллетень. 1993. Т. 7-8. С. 12-16.
6. Экологические аспекты использования термальных вод. Янин Е.П. // Экологическая экспертиза. 2019. №2. С. 74-89.
7. Геотермальная энергия: потенциал, проблемы и перспективы развития. Ал Д.Б., Аль-Идриси М.С. // Молодой ученый. 2025. №25 (576). С. 27-36.
8. Абдуллаев А.Н., Бадавов Г.Б. Защита скважины от солеотложения при одновременно раздельной эксплуатации многопластовых месторождений геотермальных вод // Термомеханика геотермальных систем: Сб. науч. Трудов, АН СССР. Даг. фил. Ин-т проблем геотермии, Махачкала: Даг. науч. центр АН СССР. 1990. С. 21-24.
9. Ахмедов Г.Я. О проблемах возврата отработанных геотермальных вод в материнский пласт. В сборнике: Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. ГЕОКАВКАЗ-2025. Материалы XV Международной научной конференции. Москва. 2025. С. 76-80.
10. Kumar A. [et al.]. Geothermal energy holds immense promise as a sustainable and renewable resource, providing a reliable and continuous power source while emitting minimal greenhouse gases. 2022.
11. U.S. Department of Energy. Enhanced Geothermal Systems: A Promising Source of Round-the-Clock Energy. 2025.

References

1. Kurbanov M.K. *Hydrothermal and hydromineral resources of the North Caucasus and Ciscaucasia* [Hydrothermal and hydromineral resources of the North Caucasus and Ciscaucasia]. Moscow: Nauka. 2001. 277 p.
2. Badavov G.B. Achievements and prospects for the development of geothermal production in the Republic of Dagestan. *Malaya energetika*. 2013. No. 1-2. Pp. 98-101.
3. Butuzov V.A., Alkhasov A.B., Aliev R.M., Badavov G.B. Geothermy of Dagestan: deposits, technologies, operation. *Okruzhayushchaya sreda i energovedeniye (OSE)*. 2021. No. 2. Pp. 4-20.
4. Alkhasov A.B. Technology of integrated development of geothermal resources of the North Caucasus region. *Teploenergetika*. 2018. No. 3. Pp. 31-34.

5. Chalayev D.R., Ochakov V.V. On the issue of utilization of spent geothermal waters. *Geothermal'naya byulleten'*. 1993. V. 7-8. Pp. 12-16.
6. Yanin E.P. Ecological aspects of the use of thermal waters. *Ekologicheskaya ekspertiza*. 2019. No. 2. Pp. 74-89.
7. Al D.B., Al-Idrisi M.S. Geothermal energy: potential, problems and development prospects. *Molodoy uchenyy*. 2025. No. 25 (576). Pp. 27-36.
8. Abdullaev A.N., Badavov G.B. Well protection from scaling during simultaneous separate exploitation of multi-layer geothermal water fields. *Termomekhanika geothermal'nykh sistem: Sb. nauch. Trudov, AN SSSR. Dag.fil. In-t problem geotermii, Makhachkala: Dag. nauch. tsentr AN SSSR*. 1990. Pp. 21-24.
9. Akhmedov G.Ya. *O problemakh vozvrata otrabotannykh geothermal'nykh vod v materinskiy plast. V sbornike: Sovremennyye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza. GEOKAVKAZ-2025* [On the problems of returning spent geothermal water to the source formation. In the collection: Modern Problems of Geology, Geophysics, and Geoecology of the North Caucasus. GEOCAUKAZ-2025]. Proceedings of the XV International Scientific Conference. Moscow. 2025. Pp. 76-80.
10. Kumar A. [et al.]. Geothermal energy holds immense promise as a sustainable and renewable resource, providing a reliable and continuous power source while emitting minimal greenhouse gases. 2022.
11. U.S. Department of Energy. Enhanced Geothermal Systems: A Promising Source of Round-the-Clock Energy. 2025.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Джелилов Галим Курбанмагомедович

соискатель ученой степени кандидата наук, старший преподаватель кафедры физики, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 367015, Махачкала, Россия

Алиев Расул Магомедович

доктор технических наук, заведующий кафедрой нефтегазового дела, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 367015, Махачкала, Россия

Ахмедов Ганапи Янгиевич

доктор технических наук, заведующий кафедрой физики, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 367015, Махачкала, Россия

Рашидханов Арип Таймасханович

старший преподаватель кафедры электроэнергетики и возобновляемых источников энергии, ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», 367015, Махачкала, Россия

Information about authors
Affiliations

Dzhelilov Galim Kurbanmagomedovich

Senior Lecturer at the Department of Physics, Dagestan State Technical University, Candidate of Science, 367015, Makhachkala, Russia

Aliyev Rasul Magomedovich

Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Oil and Gas Engineering, Dagestan State Technical University, 367015, Makhachkala, Russia

Akhmedov Ganapi Yangievich

Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Physics, Dagestan State Technical University, 367015, Makhachkala, Russia

Rashidkhanov Arip Taimaskhanovich

Senior Lecturer, Department of Electric Power Engineering and Renewable Energy Sources, Dagestan State Technical University, 367015, Makhachkala, Russia

Поступила в редакцию 25.04.2026 г.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ГИДРОГЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

¹Павлова В.Ю., ^{1,2}Гурьевна Н.О.

¹ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга»,
683032, Петропавловск-Камчатский, Россия

²Камчатский филиал ФГБУН Федерального исследовательского центра «Единая
геофизическая служба РАН», 683023, Петропавловск-Камчатский, Россия
e-mail: verpavlova88@gmail.com

В статье проанализировано развитие методов гидрогеосейсмологического мониторинга в России и за рубежом. Описана региональная специфика исследований на Камчатке, характеризующаяся пространственно-временной мозаичностью гидрогеологических откликов и высоким уровнем природных шумов. Описаны механизмы формирования флюидных аномалий на различных стадиях сейсмического цикла (подготовки, косейсмической и постсейсмической релаксации). Обосновано, что повышение достоверности краткосрочных предвестников достигается за счет комплексирования гидрогеодинамических параметров с газогидрохимическими индикаторами.

Ключевые слова: Камчатка, город Петропавловск-Камчатский, мониторинг, предвестники землетрясений, подземные воды.

DEVELOPMENT OF HYDROGEOSEISMOLOGICAL MONITORING METHODS IN RUSSIA AND ABROAD

¹Pavlova V.Yu., ^{1,2}Gurievna N.O.

¹Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

²Kamchatsky branch of the Federal Research Center «Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences», 683023, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

The article analyzes the development of hydrogeoseismological monitoring methods in Russia and abroad. The regional specificity of research in Kamchatka is described, characterized by the spatio-temporal mosaic of hydrogeological responses and a high level of natural noise. The physical and mechanical mechanisms of fluid anomalies formation at various stages of the seismic cycle (preparation, coseismic and post-seismic relaxation) are described. It is substantiated that the increase in the reliability of short-term precursors is achieved by integrating hydrogeodynamic parameters with gas-hydrochemical indicators.

Keywords: Kamchatka, the city of Petropavlovsk-Kamchatsky, monitoring, precursors of earthquakes, groundwater.

Введение

Актуальность темы исследования обусловлена возрастающей необходимостью понимания взаимосвязи между сейсмической активностью и гидрогеологическими процессами, особенно в регионах с высокой сейсмичностью. Землетрясения могут оказывать значительное влияние на подземные воды, изменяя их уровень, химический состав, температуру и дебит. Эти изменения, в свою очередь, могут служить как предвестниками сейсмических событий, так и индикаторами постсейсмических процессов, влияя на водоснабжение, экологическую обстановку и инженерные сооружения.

Исследование в данной статье проводится в рамках обзора комплексного контроля геодинамических процессов на базе Петропавловск-Камчатского полигона для обеспечения сейсмической безопасности региона (рис. 1).

Результаты исследования вносят вклад в понимание механизмов взаимодействия сейсмической активности и гидрогеологических систем. Выявленные закономерности и корреляции между сейсмическими событиями и изменениями параметров

подземных вод служит основой для дальнейших теоретических исследований в области сейсмогидрогеологии. Важна разработка более эффективных систем мониторинга гидрогеологических параметров в сейсмоактивных районах, способных детектировать аномалии, связанные с сейсмической активностью. Изучение оценки потенциального влияния землетрясений на водоснабжение и другие гидрогеологические процессы важно для планирования и принятия мер по снижению рисков, принятие обоснованных решений по эксплуатации водозаборов в сейсмоактивных зонах с учетом возможных изменений качества и количества подземных вод.

Развитие методов гидрогеосейсмологического мониторинга в России и за рубежом

В данном разделе рассматривается история формирования научных представлений о флюидодинамических и геохимических откликах подземных вод на геодинамические процессы. Понимание механизмов взаимодействия в системе «горная порода-флюид» имеет ключевое значение для интерпретации аномалий подземных вод как индикаторов изменения напряженно-деформированного



Рис. 1. Расположение города Петропавловск-Камчатский (Камчатка)

состояния (НДС) земной коры.

Теоретический фундамент гидрогеосейсмологии базируется на фундаментальных законах порупругости и механики сплошных сред. Эволюция представлений о механизмах формирования гидрогеологических откликов на процессы подготовки и реализации землетрясений прошла путь от качественной фиксации явлений до построения строгих математических моделей.

Исторически первыми классическими концепциями, объясняющими предвестниковые изменения флюидных систем в ближней зоне очага, стали дилатансионно-диффузионные модели (модели DD), разработанные в 1970-х годах [4,13]. Согласно этим моделям, на стадии деструктивного микротрещинообразования (дилатансии) происходит увеличение порового пространства пород, что вызывает падение пластового давления. Последующая диффузия флюидов в декомпрессионную зону приводит к восстановлению давления, снижению эффективного напряжения и, как следствие, к сейсмическому сдвигу.

Существенный вклад в детализацию гидрогеосейсмических процессов внесли фундаментальные теории Ч. Вонга (C.-Y. Wang) и М. Манги (M. Manga) [12,15]. В своих классических трудах авторы разделили гидрогеологические эффекты на ближнюю (статическое поле деформаций) и дальнюю (динамическое воздействие) зоны. Они доказали, что ко-сейсмические изменения уровней подземных вод в удаленной зоне (far-field) не могут быть объяснены остаточными статическими деформациями. Вонг и Манги обосновали механизм динамически индуцированного изменения проницаемости. Прохождение сейсмических волн вызывает изменение порового давления, разрушение коагелационных пробок в трещинах и переупаковку слабосцементированных грунтов, что приводит к изменениям фильтрационных свойств пласта.

В отечественной геофизической школе разви-

тие теоретических представлений связано с трудами И.Л. Писаренко, Г.А. Гамбурцева, А.А. Линькова и др. [4,5] В рамках концепции блоково-иерархического строения геосреды И.Л. Писаренко рассматривал флюидную систему как высокочувствительный объемный тензодатчик. В его моделях вариации гидрогеологических параметров интерпретируются сквозь призму нелинейной механики деформирования трещиновато-пористых коллекторов при квазистатических тектонических нагрузках. Было показано, что флюидодинамические отклики зависят от пространственного положения наблюдательной скважины относительно крупных разломных зон и границ геодинамических блоков.

Экспериментальное подтверждение теоретических моделей потребовало развертывания национальных сетей гидрогеосейсмологического мониторинга в сейсмоактивных регионах мира.

Китай располагает одной из самых разветвленных и исторически непрерывных систем мониторинга, созданной после разрушительного Хайченгского землетрясения (1975 г.). Сеть включает сотни глубоких специализированных скважин. Основной акцент сделан на фиксацию предвестников в вариациях уровня воды, температуры и концентрации газов (радон, гелий, водород). Современные исследования в КНР сфокусированы на анализе частотно-зависимых гидродинамических характеристик водоносных горизонтов с использованием приливного метода (анализ отклика на земные твердые приливы) для оценки предсейсмического изменения модулей упругости коры [15].

Японская сеть мониторинга (координируемая AIST и JMA) характеризуется максимальной степенью автоматизации и метрологической точности. Особое внимание уделяется сопряженным наблюдениям за пьезометрическим давлением в глубоких скважинах и поровым давлением на морском дне (в зонах субдукции). Японские ученые (в частности, К. Kano, М. Takahashi) внесли огромный вклад в

выделение «чистого» сейсмогенного сигнала путем прецизионной фильтрации барометрических и приливных флуктуаций [10,14].

В США основные полигоны сосредоточены вдоль разлома Сан-Андреас (Калифорния). Американский подход традиционно опирается на строгую физико-математическую валидацию данных. Исследования Геологической службы США (USGS) направлены на оценку влияния сейсмических волн на гидрологический режим речных бассейнов и дебит родников, а также на изучение наведенной (индуцированной) сейсмичности, вызванной закачкой флюидов в глубокие горизонты [8,9].

В Тайване имеется уникальная плотность режимных гидрогеологических станций, развернутых преимущественно на аллювиальных равнинах и вблизи надвигов (после землетрясения Чи-Чи 1999 г.). Тайваньский опыт ценен фиксацией крупномасштабных косейсмических шагов уровня воды и последующей многолетней релаксацией гидравлической проводимости аквиферов в ближней зоне разломов [9,12].

Анализ накопленных данных позволил установить устойчивые закономерности между кинематическими/динамическими параметрами землетрясений и морфологией гидрогеологических откликов. Вариации уровня воды (пьезометрического давления) классифицируются на три типа: предвестниковые (пресейсмические), косейсмические (происходящие непосредственно в момент прохождения волн) и постсейсмические (длиннопериодные тренды восстановления).

1. Локальные и близкие землетрясения (Near-field): В этой зоне (на расстояниях, сопоставимых с линейными размерами очага) преобладают косейсмические знаковые скачки уровня. Знак скачка (подъем или падение) жестко контролируется квадратной схемой статического поля упругих деформаций (модель Окады): в зонах сжатия пласта уровень необратимо возрастает, в зонах растяжения – падает. Амплитуда скачков экспоненциально затухает с увеличением эпицентрального расстояния.

2. Удаленные землетрясения (Far-field): На расстояниях в тысячи километров от эпицентра статические деформации пренебрежимо малы. Здесь флюидные системы реагируют исключительно на динамические напряжения, переносимые длиннопериодными поверхностными волнами Рэлея и Лява. Отклики проявляются в виде высокочастотных косейсмических осцилляций «скважина-пласт» (резонансные явления) и последующих куполообразных или ступенчатых постсейсмических изменений уровня, обусловленных раскрытием микротрещин или разрушением гидрогеологических барьеров.

В Российской Федерации данные методы получили наиболее глубокое развитие на Камчатском (КФ ФИЦ ЕГС РАН, ИКИР ДВО РАН) и Байкаль-

ском (ИЗК СО РАН) прогностических полигонах. Отечественными исследователями (Г.Н. Копылова, А.А. Любушин, Р.М. Семенов) доказано, что многомерный статистический анализ временных рядов уровня воды в глубоких скважинах позволяет выявлять скрытые синхронизированные геодинамические сигналы на стадиях задолго до макросейсмического проявления катастрофических событий [3,6,7,11].

Специфика и опыт гидрогеологических исследований на Камчатке

Переход от глобальных теоретических моделей к решению прикладных задач прогноза землетрясений требует учета региональной специфики флюидодинамических систем. Камчатский край представляет собой уникальный полигон субдукционного типа. Экстремально высокая плотность сейсмических и вулканических событий предопределила развертывание здесь в 1977 году специализированной сети наблюдений, признанной в мировом сообществе одной из наиболее репрезентативных.

Научное осмысление собранного за десятилетия массива данных обеспечено кооперацией Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН и Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Ключевую роль в формировании методологии сыграли многолетние исследования Г. Н. Копыловой, С. В. Болдиной и Ю. М. Хаткевича [1-3,6].

Фундаментальный вклад Г. Н. Копыловой [3] заключается в разработке строгих критериев сепарации сейсмогенных сигналов в системе «скважина – водовмещающая порода» от фоновых шумов (атмосферное давление, океанические приливы). Ю.М. Хаткевич [6] детализировал закономерности динамики химического и газового состава гидротермальных систем. Он доказал их высокую индикаторную чувствительность к региональным перестройкам полей напряжений. В работах С.В. Болдиной [1,2] осуществлено математическое моделирование фильтрационных процессов в прискважинных зонах при динамическом нагружении. Это позволило увязать амплитудно-частотные параметры гидрогеологических откликов с тензочувствительностью и упругими модулями водовмещающих коллекторов.

Опыт эксплуатации Камчатского геодинамического полигона позволил разработать генетическую классификацию сейсмогидрогеологических эффектов, разделяющую их на три временных этапа относительно момента генерации сейсмического события:

1. Гидрогеологические предвестники (пресейсмические аномалии): Возникают на стадии квазистатической подготовки очага землетрясения за недели или месяцы (среднесрочные) либо за сутки и часы (краткосрочные) до главного толчка.

2. Косейсмические эффекты: Мгновенные ступенчатые или осцилляторные изменения

гидродинамических параметров непосредственно в момент прохождения объемных и поверхностных сейсмических волн.

3. Постсейсмические изменения: Долговременная (от недель до месяцев) релаксация пластового давления и стабилизация макрокомпонентного состава подземных вод.

Ключевой методологический элемент камчатской системы мониторинга – использование глубоких параметрических скважин в качестве высокочувствительных объемных деформометров. Скважина, вскрывающая напорный водоносный горизонт под мощным водоупором, выступает в роли природного гидравлического усилителя тектонических движений.

Механизмы формирования гидрогеодинамических и гидрогеохимических аномалий

Понимание физической природы и генезиса флюидодинамических и геохимических аномалий, индуцированных сеймотектоническими процессами, необходимо для корректной интерпретации данных гидрогеосейсмологического мониторинга. Современные представления о механизмах взаимодействия в системе «горная порода-флюид» позволяют количественно связать наблюдаемые вариации параметров подземных вод с динамическими и статическими изменениями напряженно-деформированного состояния (НДС) вмещающей среды.

В основе формирования гидрогеодинамических откликов лежат фундаментальные принципы пороупругости Био-Френкеля, согласно которым изменение объемной деформации матрицы породы приводит к пропорциональному изменению порового (пластового) давления. Под воздействием тектонических напряжений и при прохождении сейсмических волн в коллекторах развиваются знакопеременные упругие нагрузки.

Механизм косейсмического и предвестникового падения пластового давления (и адекватного снижения уровня воды в скважинах) преимущественно связывается с эффектом дилатансии – неупругого объемного расширения трещиновато-пористых пород при сдвиговых деформациях. В условиях тектонического растяжения или знакопеременного акустического воздействия происходит раскрытие существующих и генерация новых микротрещин. Это приводит к резкому увеличению эффективной пористости и емкости коллектора при неизменном объеме насыщающего флюида, вытягивая воду из прискважинной зоны и вызывая падение пьезометрического напора. Напротив, в зонах упругого сжатия уменьшение объема пор генерирует положительные скачки давления. Дополнительным фактором долгоживущих постсейсмических изменений уровня является сейсмогенное изменение проницаемости массива. Динамические напряжения вызывают разрушение коагуляционных про-

бок в трещинах, переупаковку зерен слабосцементированных грунтов и разрушение гидравлических барьеров, что перестраивает локальную фильтрационную сеть и перераспределяет пластовое давление.

Динамическое воздействие сейсмических волн на водоносные комплексы инициирует не только гидродинамические, но и выраженные гидрогеохимические инверсии. Они проявляются в кратковременном или устойчивом изменении минерализации, газового режима и концентраций макрокомпонентных индикаторных ионов.

Основным физическим механизмом, объясняющим данные инверсии, признан процесс межпластового (вертикального) перетока флюидов. В естественных условиях водоносные горизонты с различным химическим составом, возрастом и термобарическими параметрами изолированы друг от друга слабопроницаемыми разделяющими пластами (глинистыми или плотными кристаллическими толщами). Во время сейсмического процесса происходит нарушение сплошности и гидроизолирующих свойств этих разделов путем генерации субвертикальных микротрещин или деструкции локальных геохимических барьеров. Из-за существования градиентов пластового давления активизируется гидравлическое смешивание вод из смежных горизонтов. Поступление глубоких высокотермальных или высокоминерализованных флюидов в наблюдательный пласт приводит к резкому сдвигу химического равновесия, что фиксируется на устье скважин по изменению соотношений индикаторных ионов. После затухания сейсмической активности и релаксации напряжений под влиянием процессов гравитационного уплотнения и коагуляции трещин происходит восстановление нарушений, и химический состав подземных вод постепенно стабилизируется [4].

Современный этап развития гидрогеосейсмологии характеризуется переходом от качественного описания аномалий к их строгому математическому моделированию. Установление количественных корреляций между параметрами сейсмического источника и гидрогеологическими откликами позволяет использовать скважины как калиброванные деформометры.

Результаты исследований и их обсуждение

В рамках исследований проанализирован комплексный научно-исследовательский цикл, направленный на изучение гидрогеосейсмологических откликов флюидодинамических систем на современные геодинамические процессы.

Анализ эволюции гидрогеосейсмологических наблюдений показывает качественный переход от дискретного (ручного) отбора проб к автоматизированным измерительным комплексам в реальном времени. В международной практике (особенно в Японии, США и Тайване) акцент сместился на

создание сверхглубоких мониторинговых скважин. Используются высокоточные кварцевые датчики давления с разрешением до первых миллиметров водяного столба. Внедрен непрерывный масс-спектрометрический анализ изотопного состава подземных флюидов.

В отечественной науке сформировалась сильная фундаментальная база, опирающаяся на концепцию гидрогеодеформационного (ГГД) поля Земли. Современный этап развития методов в России характеризуется интеграцией гидрогеологических наблюдений в единые телеметрические сети комплексного геофизического мониторинга. Это позволяет сопоставлять гидродинамические вариации с сейсмичностью, деформациями земной коры и эманиями подпочвенных газов.

Камчатский регион обладает уникальной спецификой, обусловленной активным субдукционным режимом и интенсивным вулканизмом. Опыт многолетних наблюдений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне выявил ряд региональных особенностей [1-3].

Одинаковые по магнитуде сейсмические события вызывают разнонаправленные реакции (как подъем, так и падение уровней) даже в близкорасположенных скважинах. Это указывает на доминирующую роль локальной геоструктурной позиции каждого наблюдательного пункта.

Близость океанического побережья накладывает на гидродинамический режим мощный фон барометрических и приливных флуктуаций. Для выделения тектонических предвестников требуется

обязательное применение процедур математической фильтрации (компенсации атмосферного давления и лунно-солнечных приливов).

Под действием нарастающих тектонических напряжений происходит упругая деформация водонасыщенных пород. Изменение порового давления в водоносных горизонтах приводит к изменению уровней и дебитов подземных вод. Одновременно с этим микроразрывы и раскрытие субвертикальных трещин активизируют процессы выщелачивания минеральной матрицы. Это вызывает скачкообразный рост концентрации макро- и микрокомпонентов (гидрогеохимический отклик). Прохождение сейсмических волн вызывает динамическое сжатие или растяжение коллекторов, а также наведенную сейсмическую консолидацию грунтов. Происходит мгновенная разгрузка напряжений, часто сопровождающаяся гидродинамическими «ударами» и разрушением изолирующих экранов в водоносных комплексах. После прохождения основного процесса гидрогеологическая система стремится к новому термодинамическому равновесию.

Заключение

Сопоставление мирового опыта с результатами, полученными на Петропавловск-Камчатском полигоне, подтверждает, что гидрогеологический мониторинг является неотъемлемым элементом систем раннего оповещения. Главная проблема гидрогеосейсмологии – непостоянство пространственно-временного проявления предвестников – на Камчатке успешно решается за счет перехода к комплексированию методов.

Данная работа составлена в рамках реализации следующих программ КамГУ имени Витуса Беринга: Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030. Дальний Восток» и выполнения госзадания «Развитие системы комплексного геофизического мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений, функционирующей на территории Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона» (FZSS-2025-0007).

Список литературы

1. Болдина С.В., Копылова Г.Н. Эффекты Жупановского землетрясения 30 января 2016 г., $M_w=7.2$, в изменениях уровня воды в скважинах ЮЗ-5 и Е-1, Камчатка // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. №4. С. 863-880.
2. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Исследование косейсмических изменений давления подземных вод на Камчатке по данным высокоточных измерений // Физика Земли. 2023. №3. С. 78-95.
3. Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеодинамические эффекты землетрясений в системе «скважина – водовмещающая порода» (на примере Камчатки). Владивосток: Дальнаука. 2012. 195 с.
4. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А., Шамина О.Г. Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясения. М.: Наука. 1975. С. 6-29.
5. Линьков А.А. Механика деформирования блочных сред и флюидодинамические эффекты // Геофизические процессы и биосфера. 2008. Т. 7. №2. С. 15-32.
6. Хаткевич Ю.М. Сейсмогидрогеохимические предвестники землетрясений на Камчатке (по результатам многолетних наблюдений в Пиначевской флюидодинамической системе) // Вулканология и сейсмология. 2001. №6. С. 53-64.
7. Хаткевич Ю.М., Рябинин Г.В. Гидрогеохимические исследования на Камчатке в связи с поиском предвестников землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2006. №4. С. 34-42.
8. Brodsky E.E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M. A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquake. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2003. V. 108. No. B8. Art. No. 2390. DOI: 10.1029/2002JB002321.
9. Elkhoury J.E., Brodsky E.E., Agnew D.C. Seismic waves increase permeability. Nature. 2006. V. 441. No. 7097. Pp. 1135-1138. DOI: 10.1038/nature04798.
10. Kano Y., Yanagidani T. Poroelastic response of water level in a deep well in Toki, Japan, to seismic waves. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2006. V. 111. No. B7. Art. No. B07301. DOI: 10.1029/2005JB003874.
11. Khatkevich Yu.M., Ryabinin G.V. Geochemical and Ground-Water Studies in Kamchatka in the Search for Earthquake Precursors. Journal of Volcanology and Seismology. 2006. No. 4. Pp. 235-242.

12. Manga M., Beresnev I., Brodsky E.E. et al. Seismic permeability enhancement: A review of mechanisms. *Pramana*. 2012. V. 79. No. 5. Pp. 967-983. DOI: 10.1007/s12043-012-0432-1.
13. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: A physical basis. *Science*. 1973. V. 181. No. 4102. Pp. 803-810. DOI: 10.1126/science.181.4102.803.
14. Tsunogai U., Wakita H. Anomalous changes in groundwater chemistry before the Kobe earthquake. *Science*. 1995. Vol. 269. No. 5220. Pp. 61-63. DOI: 10.1126/science.269.5220.61.
15. Wang C.-Y., Manga M. *Earthquakes and Water*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2010. 226 p. DOI: 10.1007/978-3-642-00810-8.
16. Wang C.-Y., Manga M. Hydrologic responses to earthquakes and a general metric. *Geofluids*. 2010. V. 10. No. 1-2. Pp. 206-216. DOI: 10.1111/j.1468-8123.2010.00279.x.

References

1. Boldina S.V., Kopylova G.N. Effects of the Zhupanov earthquake of January 30, 2016, $M_w=7.2$, in changes in the water level in wells SW-5 and E-1, Kamchatka. *Geodinamika i tektonofizika*. 2017. V. 8. No. 4. Pp. 863-880.
2. Kopylova G.N., Boldina S.V. Study of Coseismic Changes in Groundwater Pressure in Kamchatka Based on High-Precision Measurements. *Fizika Zemli*. 2023. No. 3. Pp. 78-95.
3. Kopylova G.N., Boldina S.V. *Gidrogeodinamicheskiye efekty zemletryaseniy v sisteme «skvazhina – vodovmeshchayushchaya poroda» (na primere Kamchatki)* [Hydrogeodynamic effects of earthquakes in the system «well – water-bearing rock» (on the example of Kamchatka)]. Vladivostok: Dalnauka. 2012. 195 p.
4. Myachkin V.I., Kostrov B.V., Sobolev G.A., Shamina O.G. Fundamentals of Focus Physics and Harbingers of Earthquakes. *Fizika ochaga zemletryaseniya*. Moscow: Nauka. 1975. Pp. 6-29.
5. Linkov A.A. Mechanics of Deformation of Block Media and Fluid-Dynamic Effects. *Geofizicheskiye protsessy i biosfera*. 2008. V. 7. No. 2. Pp. 15-32.
6. Khatkevich Yu.M. Seismohydrogeochemical Precursors of Earthquakes in Kamchatka (Based on the Results of Long-Term Observations in the Pinachevo Fluid-Dynamic System). *Vulkanologiya i seysmologiya*. 2001. No. 6. Pp. 53-64.
7. Khatkevich Yu.M., Ryabinin G.V. Hydrogeochemical Studies in Kamchatka in Connection with the Search for Earthquake Precursors. *Vulkanologiya i seysmologiya*. 2006. No. 4. Pp. 34-42.
8. Brodsky E.E., Roeloffs E., Woodcock D., Gall I., Manga M. A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2003. V. 108. No. B8. Art. No. 2390. DOI: 10.1029/2002JB002321.
9. Elkhoury J.E., Brodsky E.E., Agnew D.C. Seismic waves increase permeability. *Nature*. 2006. V. 441. No. 7097. Pp. 1135-1138. DOI: 10.1038/nature04798.
10. Kano Y., Yanagidani T. Poroelastic response of water level in a deep well in Toki, Japan, to seismic waves. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2006. V. 111. No. B7. Art. No. B07301. DOI: 10.1029/2005JB003874.
11. Khatkevich Yu.M., Ryabinin G.V. Geochemical and Ground-Water Studies in Kamchatka in the Search for Earthquake Precursors. *Journal of Volcanology and Seismology*. 2006. No. 4. Pp. 235-242.
12. Manga M., Beresnev I., Brodsky E.E. et al. Seismic permeability enhancement: A review of mechanisms. *Pramana*. 2012. V. 79. No. 5. Pp. 967-983. DOI: 10.1007/s12043-012-0432-1.
13. Scholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake prediction: A physical basis. *Science*. 1973. V. 181. No. 4102. Pp. 803-810. DOI: 10.1126/science.181.4102.803.
14. Tsunogai U., Wakita H. Anomalous changes in groundwater chemistry before the Kobe earthquake. *Science*. 1995. Vol. 269. No. 5220. Pp. 61-63. DOI: 10.1126/science.269.5220.61.
15. Wang C.-Y., Manga M. *Earthquakes and Water*. Berlin, Heidelberg: Springer. 2010. 226 p. DOI: 10.1007/978-3-642-00810-8.
16. Wang C.-Y., Manga M. Hydrologic responses to earthquakes and a general metric. *Geofluids*. 2010. V. 10. No. 1-2. Pp. 206-216. DOI: 10.1111/j.1468-8123.2010.00279.x.

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Павлова Вероника Юрьевна

кандидат геолого-минералогических наук, доцент, доцент кафедры биологии и наук о Земле факультета естественных и технических наук, ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга», 683032, Петропавловск-Камчатский, Россия

Гурьевна Наталья Олеговна

магистрантка 2-ого курса кафедры биологии и наук о Земле факультета естественных и технических наук, ФГБОУ ВО «Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга», 683032, Петропавловск-Камчатский, Россия; инженер лаборатории геофизических исследований Камчатского филиала ФГБУН Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», 683032, Петропавловск-Камчатский, Россия

Information about authors Affiliations

Pavlova Veronika Yuryevna

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Biology and Earth Sciences, Faculty of Natural and Technical Sciences, Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Guryevna Natalia Olegovna

Second-year Master's Student, Department of Biology and Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Vitus Bering Kamchatka State University, 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; Engineer, Geophysical Research Laboratory, Kamchatka Branch, Federal Research Center «Unified Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences», 683032, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Поступила в редакцию 24.04.2026 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТАВА ЗЕМЕЛЬ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА СИНТЕЗИРОВАННЫХ И ИНДЕКСНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Ассех К.Ф., Беленко В.В.

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»,

105064, Москва, Россия

e-mail: belenko.v.v@yandex.ru

Мониторинг землепользования является одним из главных приоритетов рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды в Кот-д'Ивуаре. В городе Абиджан, экономической столице Кот-д'Ивуара, наблюдаются пространственно-временные изменения в землепользовании, вызванные антропогенной деятельностью и ростом населения. В рамках данного исследования была предложена методология для обнаружения и идентификации пространственно-временных изменений в составе земель на основе мультиспектральных снимков Landsat, охватывающих период с 2000 по 2022 год. Был разработан метод комбинации спектральных индексов (NDBI, NDVI, NDSI, SAVI, NDWI) с определенными пороговыми значениями. Полученные результаты показали увеличение площади застроенных территорий и сокращение других видов землепользования. Общая точность, превышающая 94%, что свидетельствует о надёжности методологии.

Ключевые слова: землепользование, космические снимки, пространственно-временное изменение, тематическая картография, Абиджан.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON THE PRACTICAL IMPLEMENTATION OF METHODS FOR DETECTING CHANGES IN LAND COMPOSITION BASED ON A COMPLEX OF SYNTHESIZED AND INDEXED IMAGES

Asseh K.F., Belenko V.V.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Land-use monitoring is one of the main priorities for the sustainable use of natural resources and environmental protection in Ivory Coast. The city of Abidjan, the economic capital of Ivory Coast, is experiencing spatio-temporal changes in land use due to human activities and population growth. As part of this study, a methodology was proposed to detect and identify spatio-temporal changes in land cover using Landsat multispectral imagery covering the period from 2000 to 2022. Two complementary approaches were developed: a combination of spectral indices (NDBI, NDVI, NDSI, SAVI, NDWI) with specific thresholds. The results revealed an increase in built-up areas and a decrease in other land-use types. The overall accuracy, which exceeds 94%, demonstrates the reliability of the methodology.

Keywords: land use, satellite imagery, spatio-temporal change, thematic cartography, Abidjan.

Введение

В последние годы нормальное функционирование глобальной земной системы было нарушено резкими и систематическими изменениями в её различных компонентах [1,2]. Изменение землепользования является надёжным индикатором совокупного воздействия природных явлений и антропогенной деятельности на Земле [3,4]. Социально-экономические факторы, такие как рост населения, экономическое развитие, урбанизация и политика, специфичная для каждого места и конкретного момента времени, являются основными причинами изменения землепользования в Африке [5]. Абиджан, экономическая столица Кот-д'Ивуара, как и все крупные африканские города на протяжении десятилетий, сталкивается с ускоренным пространственным и демографическим ростом [6]. Однако эта урбанизация сопровождается множеством проблем, таких как сокращение растительного покрова, деградация почв, расширение площадей непроницаемых поверхностей [7]. В этом контексте

необходимо отслеживать и количественно оценивать динамику землепользования в этом густонаселённом районе.

Материалы и методы исследования

Объект исследования. В качестве объекта исследования выбран город Абиджан на территории Кот-д'Ивуара (рисунок 1). Абиджан – экономическая столица Кот-д'Ивуара, с населением 4.5 миллиона человек (по состоянию на 2025 год), что составляет 20% от общей численности населения страны, является одним из самых густонаселённых городов франкоязычной Африки. Он расположен на юге Кот-д'Ивуара, на краю Гвинейского залива и пересекается лагуной Эбрие. Абиджан занимает область около 12 км с севера на юг и около 10 км с востока на запад [8].

Для исследования отобраны данные ДЗЗ из космоса, соответствующие продолжительному сухому сезону (с декабря по февраль) периоду, в течение которого облачный покров является самым низким. Кроме того, этот выбор способствует снижению

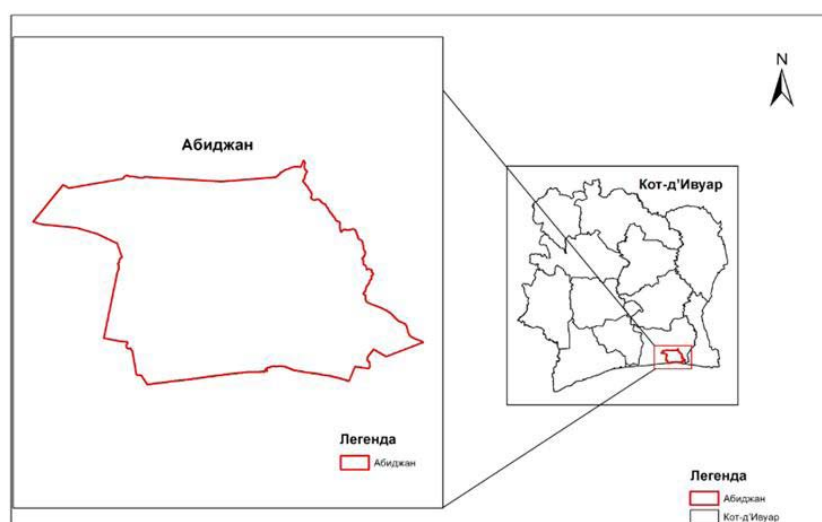


Рис. 1. Расположение района исследования выделено красными линиями

возможных сезонных эффектов (таблице 1).

Методы исследования. Цифровая обработка спутниковых изображений осуществлялась в два основных этапа: предварительная обработка и обработка.

Предварительная обработка. Предварительная обработка, выполненная в QGIS, включала атмосферную коррекцию с помощью алгоритма DOS1 (Dark Object Subtraction) для уменьшения мешающих эффектов атмосферы [9,10]. Затем были созданы мозаики и цветовые комбинации спектральных полос (7-6-4, 5-4-3, 6-5-4, 6-4-2 и 4-3-2) с целью облегчения визуальной интерпретации, которые послужили основой для определения границ обучаю-

щих зон для контролируемой классификации.

Контролируемая классификация. Используемый нами алгоритм классификации SCP (Semi-Automatic Classification Plugin) в программе QGIS требует определения двух уровней классификации: уровня метаклассов и уровня классов. Метакласс – это, например, растительность, которая объединяет такие классы, как леса и луга. Каждый метакласс и каждый класс будет иметь метку, а также целочисленный идентификатор, необходимый для работы алгоритма классификации. В нашем случае классификация снимков Landsat была выполнена, как указано в таблице 2.

Было выделено шесть мета-классов,

Таблица 1

Исходные снимки для анализа изменений

Территория	Спутник	Дата съемки	Пролет, сцена
г. Абиджан	LANDSAT 7	2000-02-02	195/56
	LANDSAT 7	2000-02-09	195/56
	LANDSAT 8	2017-12-25	195/56
	LANDSAT 8	2017-01-14	195/56
	LANDSAT 9	2022-12-31	195/56
	LANDSAT 9	2022-12-31	196/56

Таблица 2

Иерархия классов землепользования¹

ID (идентификация) мета-класса	Метка мета-класса	ID (идентификация) класса	Метка класса
1	застроенные территории	1	застроенные территории
2	густой лес	2	густой лес
3	вторичный лес	3	вторичный лес
4	посадки леса	4	посадка леса
5	поверхностные водотоки и водоемы	5	поверхностные водотоки и водоемы
6	открытые грунты	6	открытые грунты

¹Категория землепользования приведен в соответствии с законодательством Кот-д'Ивуара и реквизиты того документа, который это содержит:
 – Закон №2019-675 от 23 июля 2019 года о Лесном кодексе;
 – Закон №2014-417 от 14 августа 2014 года об управлении лесами;
 – Закон №96-766 от 3 октября 1996 года о воде;
 – Закон №98-750 от 23 декабря 1998 года о Кодексе сельских земель;
 – Закон №2014-141 от 24 марта 2014 года об Экологическом кодексе.

подразделенных на шесть классов землепользования. Затем для каждого класса были определены и оцифрованы полигоны обучения ROI (Region Of Interest), чтобы отразить спектральную изменчивость внутри одного и того же класса и послужить основой для обучения алгоритма классификации. Затем была применена классификация с помощью алгоритма максимального правдоподобия и оценена с помощью матрицы ошибок, коэффициента Каппа и общей точности, сгенерированных алгоритмом SCP программного обеспечения QGIS. Наконец, классифицированные изображения были векторизованы и преобразованы в тематические карты, иллюстрирующие пространственно-временную динамику землепользования.

Статистический анализ темпов изменения единиц землепользования

Для количественной оценки изменений в землепользовании после классификации снимков был

проведен статистический анализ различных классов. Использовались два показателя: коэффициент общего изменения (Tg) позволил определить изменение площади каждого класса землепользования между двумя периодами исследования, а среднегодовой коэффициент пространственной экспансии (Tc) позволил детально оценить изменения, произошедшие внутри каждого класса землепользования [11].

Анализ спектральных индексов

Для индивидуального определения каждого класса землепользования мы использовали комбинацию спектральных индексов с определением конкретных пороговых значений для каждого класса землепользования (таблица 3).

Результаты и обсуждение

Классификация изображений Landsat, на основе синтеза каналов 7-6-4, 5-4-3, 6-5-4, 6-4-2 и 4-3-2, позволила определить шесть основных классов

Таблица 3

Спектральные индексы, используемые для различения различных классов землепользования

Цель анализа	Спектральные индексы	Математическое выражение (растровый калькулятор QGIS)	Роль в обнаружении
Оценка расширения застроенных территорий	NDBI и NDVI	$\frac{((("B6@1" - "B5@1") / ("B6@1" + "B5@1" + 0.0001)) > -0.01) \text{ AND } ((("B5@1" - "B4@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.0001)) < 0.2)}$	NDBI > -0,01 (выбор зон застройки) и NDVI < 0,2. Константа 0,0001 предотвращает деление на 0, обеспечивая цифровую стабильность.
Идентификация густых лесов	NDVI	$((("B5@1" - "B4@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.0001)) > 0.6)$	NDVI > 0,6 позволяет отличить густые леса от других типов землепользования
Нарушение вторичных лесов	NDVI	$((("B5@1" - "B4@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.0001)) > 0.3) \text{ AND } ((("B5@1" - "B4@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.0001)) < 0.6)$	0,3 < NDVI < 0,6 позволяет отличить вторичные леса от густых лесов (NDVI > 0,6)
Обнаружение посадок леса	SAVI	$(((("B5@1" - "B4@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.5)) * 1.5) > 0.1452 \text{ AND } ((("B5@1" - "B4@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.5)) * 1.5) \leq 0.3984)$	0,1452 ≤ SAVI ≤ 0,3984 позволяет включить только сельскохозяйственные насаждения
Идентификация поверхностных водотоков и водоемов	NDWI, NDVI и NDBI	$(((("B2@1" - "B4@1") / ("B2@1" + "B4@1" + 0.5)) * 1.5) > 0 \text{ AND } ((("B3@1" - "B5@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.0001)) > 0.1318) \text{ AND } ((("B6@1" - "B5@1") / ("B6@1" + "B5@1" + 0.0001)) < 0.1)$	NDWI > 0 обнаружение и идентификация водоемов. NDVI > -0,1318 исключение растительности. NDBI < 0,1, исключение городских зон и зданий.
Идентификация открытых грунтов	NDSI, NDVI, NDBI	$(((("B6@1" - "B3@1") / ("B6@1" + "B3@1" + 0.0001)) > 0.2) \text{ AND } ((("B5@1" - "B4@1") / ("B5@1" + "B4@1" + 0.0001)) < 0.2) \text{ AND } ((("B6@1" - "B5@1") / ("B6@1" + "B5@1" + 0.0001)) < 0.02)$	NDSI > 0,2 позволяет выделять классы на основе значительного контраста между полосами. NDVI < 0,2 исключает зоны с растительностью. NDBI > 0,02 исключает зоны, которые можно спутать с открытыми грунтами.

землепользования – застроенные территории, густые леса, вторичные леса, посадки леса, поверхностные водотоки и водоёмы и открытые грунты (рисунок 2).

Анализ матриц ошибок результатов классификации для изображений 2000, 2017 и 2022 годов показывает, что результаты классификации 2000 и 2017 годов были менее удовлетворительны, чем результаты, полученные в 2022 году. Так, значения индексов пикселей, правильно отнесенных к различным классам в 2000 и 2017 годах, показывают общую точность 94.99 % и статистический коэффициент Каппа-Коэна 0.93 для 2000 года, а для 2017 года общая точность составляет 94.06%, а статистический коэффициент Каппа-Коэна 0.92, что ниже,

чем результаты, полученные в 2022 году. Фактически, значения индекса для пикселей 2022 года, правильно отнесенных к классам, указывают на общую точность 97.17 % и статистический коэффициент Каппа-Коэна 0.96.

Анализ изменений за весь период исследования проводился путем сопоставления площадных данных с результатами классификации. Матрица обнаружения изменений была создана путем сравнения классификаций между тремя датами (2000, 2017 и 2022). Этот метод позволял получить общее представление об изменениях, происходивших на изучаемой территории. Состояние земного покрова за 2000, 2017 и 2022 годы на территории анализа представлено в таблице 4 и на рисунке 3.

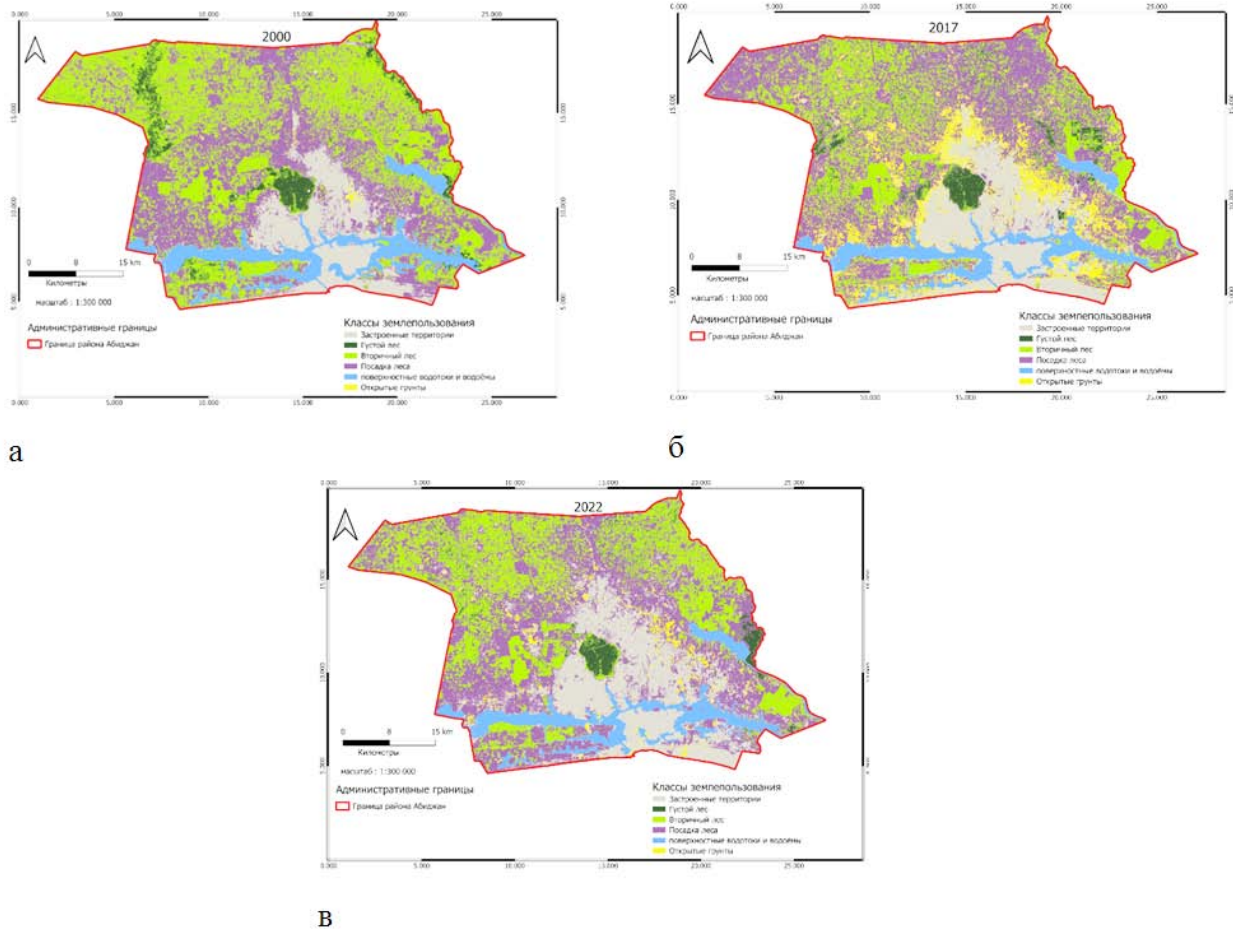


Рис. 2. Карто-схема землепользования в Абиджане за период: а – 2000; б – 2017; в – 2022

Таблица 4

Площадь в квадратных километрах (км²) и процент (%) классов землепользования

Классы землепользования	Площадь 2000		Площадь 2017		Площадь 2022	
	км ²	Процент (%)	км ²	Процент (%)	км ²	%
Застроенные территории	246.04	11.68	332.07	15.76	435.28	21.62
Густой лес	119.55	5.67	77.82	3.72	64.05	3.18
Вторичный лес	793.72	37.67	435.98	20.69	521.60	25.89
Посадки леса	749.99	35.60	888.18	42.15	866.47	43.02
Поверхностные водотоки и водоёмы	184.91	8.78	165.38	7.85	169.45	3.78
Открытые грунты	120.72	5.73	207.45	9.84	50.61	2.51
Итого	2 107.45	100	2 107.45	100	2 107.45	100

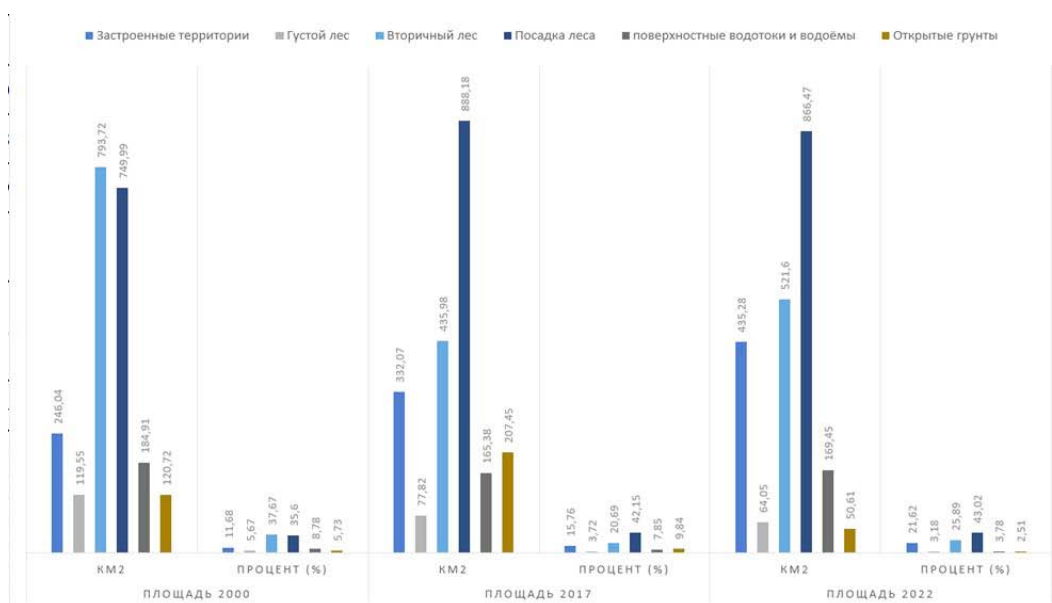


Рис. 3. Диаграмма эволюции площадей различных классов земного покрова 2000, 2017 и 2022 гг.

Следуя приведенной выше таблице, была построена диаграмма эволюции площадей различных классов землепользования 2000, 2017 и 2022 годов.

Анализ диаграммы показывает две тенденции. С одной стороны, значительно уменьшилась площадь вторичных лесов (с 37.67% до 25.89%), поверхностных водотоков и водоёмов (с 8.78% до 3.78%), незначительно снизился густой лес (с 5.67% до 3.18%) и открытые грунты (с 5.73% до 2.51%). С другой стороны, увеличилось количество застроенных территорий (с 11.68% до 21.62%) и посадки леса (с 35.60% до 43.02%).

Значительное уменьшение площади вторичных лесов, поверхностных водотоков и водоёмов и незначительное снижение густого леса и открытых грунтов, наблюдаемое на диаграмме, может свидетельствовать об ухудшении состояния окружающей среды и усилении урбанизации исследуемой территории. Однако эти изменения могут быть также связаны с давлением со стороны сельского хозяйства, лесопользования, климатических колебаний, деградации почв и пожаров растительного покрова. Действительно, увеличение площади застроенных территорий и посадки леса указывает на расширение городской инфраструктуры и экономической деятельности.

В этой связи оценка землепользования с 2000 по 2022 год представлена в таблице 5. Она суммирует различные классы землепользования и уровни изменения, которые являются следующими: общая скорость изменения (T_g) и среднегодовая норма пространственного расширения (T_c).

Анализ таблицы показывает, что из шести определенных классов земного покрова четыре испытали снижение. Эти классы представляют густой лес, вторичный лес, поверхностные водотоки и водоёмы, и открытые грунты, в которых за этот период зафиксировано снижение: густой лес на 2.64%, вторичный лес – 1.90%, поверхностные водотоки и водоёмы – 0.39% и 4.14% – открытые грунты соответственно. Кроме того, значительно увеличились два других класса землепользования, а именно застроенные территории (2.41%) и посадки леса (0.63%). Действительно, это увеличение застроенных территорий и посадки леса наносит ущерб лесам и открытым грунтам.

Результаты, полученные в результате объединения спектральных индексов с определением пороговых значений для каждой категории использования, позволили нам создать двоичные изображения, преобразованные в вектор, что дало возможность индвидуально различать различные классы. В таблице 6

Таблица 5

Оценка землепользования с 2000 по 2022 гг.

Классы землепользования	Общая скорость изменения (T_g) (%)	Среднегодовая скорость пространственного расширения (T_c) (%)
Застроенные территории	+76.91	+2.41
Густой лес	-46.43	-2.64
Вторичный лес	-34.27	-1.90
Посадки леса	+15.53	+0.63
Поверхностные водотоки и водоёмы	-8.36	-0.39
Открытые грунты	-58.08	-4.14

представлена эволюция застроенных территорий и незастроенных территорий, а в таблице 7 – переходы для застроенных территорий.

Анализ результатов, полученных с помощью комбинации NDBI и NDVI, показывает значительное увеличение площади урбанизированных территорий в период с 2000 по 2022 год. В 2000 году площадь составляла 100.71 км², или примерно 4.99%, а затем в 2017 году увеличилась до 468,86 км², то есть за 17 лет произошло увеличение на 368.15 км², что объясняется периодом ускоренной урбанизации, связанным с сильным ростом населения, оттоком населения из сельских районов и неконтролируемой урбанизацией. Затем застроенные территории увеличиваются, достигнув 581.42 км² в период с 2017 по 2022 год, то есть на 112.56 км² больше, чем за пять лет. Анализ динамики площади исследуемой территории показывает постоянное сокращение площади незастроенных территорий: в 2000 году она составляла 2 006.75 км², в 2017 году сократилась до 1 638,59 км², а затем – до 1 526.03 км².

Затем мы исследовали динамику развития густых лесов, а также отслеживали их эволюции (таблицы 8 и 9), где показаны изменения за 17 лет.

Хронологический анализ, основанный на результатах NDVI, показывает динамику изменений на исследуемой территории в период с 2000

по 2022 год. Наблюдается постоянное сокращение площади густых лесов в период с 2000 по 2022 год: с 588.88 км², что составляет примерно 29.19% от общей площади города Абиджан, до 463.01 км², что соответствует сокращению на 125.87 км² в год, или примерно на 21.37% в 2017 году, а затем до 438.04 км² в 2022 году. Анализ динамики густых лесов за три исследуемых периода показывает их постоянное сокращение. Это явление объясняется сильным антропогенным воздействием на лесной покров. Что касается вторичных лесов, то в таблицах 10-11 представлен анализ их пространственного распределения с 2000 по 2022 год по всему округу Абиджан.

Анализ данных мультиспектральной космической съемки свидетельствует о продолжающейся деградации вторичных лесов. Их площадь, которая в 2000 году составляла 578.92 км² (27.7%), сократилась до 501.73 км² в 2017 году, что соответствует уменьшению на 77.19 км² и темпам утраты в 4.54 км² в год. Эта значительная потеря сопровождается увеличением дефицита вторичных лесов, что приводит к расширению сельскохозяйственных угодий и территорий, используемых для деятельности человека. В период с 2017 по 2022 год, напротив, будет наблюдаться более умеренное сокращение площади вторичных лесов – на 21.25 км², или 4.25 км² в

Таблица 6

Развитие застроенных территорий и отсутствие застроенных территорий

Год	Застроенные территории (км ²)	Отсутствие застроенных территорий(км ²)	Итого (км ²)
2000	100.71	2006.75	2107.45
2017	332.06	1775.39	2107.45
2022	342.94	1764.54	2107.45

Таблица 7

Переходы застроенных территорий

Период	Площадь застроенных территорий, приобретенных (км ²)	Развитие (%)
с 2000 по 2017 год	+368.15	+ 365.78
с 2017 по 2022 год	+112.52	+24
с 2000 по 2022 год	+480.71	+477.36

Таблица 8

Развитие густого леса и отсутствие густого леса

Год	Густой лес (км ²)	Отсутствие густого леса (км ²)	Итого (км ²)
2000	588.88	1518.57	2107.45
2017	463.01	1654.44	2107.45
2022	438.04	1669.41	2107.45

Таблица 9

Переходы густого леса

Период	Площадь утраченного густого леса (км ²)	Развитие (%)
с 2000 по 2017 год	-125.87	-21.37
с 2017 по 2022 год	-24.97	-5.39
с 2000 по 2022 год	-150.84	-25.61

Таблица 10

Развитие вторичных лесов и отсутствие вторичных лесов

Год	Вторичный лес (км²)	Отсутствие вторичного леса (км²)	Итого (км²)
2000	578.92	1528.53	2107.45
2017	501.73	1605.72	2107.45
2022	480.48	1626.97	2107.45

Таблица 11

Переходы вторичных лесов

Период	Площадь утраченного Вторичного леса (км²)	Развитие (%)
с 2000 по 2017 год	-77.19	-13.33
с 2017 по 2022 год	-21.25	-4.23
с 2000 по 2022 год	-98.44	-17

год. Из вышесказанного можно сделать вывод, что наибольшая потеря вторичных лесов произошла в период с 2000 по 2017 год из-за разрастания городов и незапланированного роста населения, а также усиления давления на земли для пригородного сельского хозяйства.

Пространственно-временная динамика изменений посадок лесов представлена в таблицах 12 и 13.

В 2000 году площадь посадки леса в области нашего исследования составляла 589.72 км² (27.98%). В период с 2000 по 2017 год площадь посадки леса значительно сократилась, достигнув 464.33 км², что соответствует снижению на 21.26% при среднегодовом темпе сокращения 1.25%, то есть потере почти одной пятой от первоначальной площади менее чем за два десятилетия. Эта значительная потеря объясняется несколькими факторами, в частности растущим давлением со стороны быстрого расширения городских территорий и нерациональной эксплуатацией лесных ресурсов. В период с 2017 по 2022 год

площадь сократилась на 38.09 км², что соответствует снижению примерно на 8.20% за 5 лет при годовом темпе сокращения 1.64%. За 22-летний период с 2000 по 2022 год площадь посадки леса сократилась с 589.72 км² до 426.24 км², что соответствует снижению на 27.72% при годовом темпе сокращения 1,26%.

Результат комбинации трех спектральных индексов с определенными пороговыми значениями (NDWI, NDVI и NDBI) позволил точно идентифицировать водотоки и поверхностные водоёмы, минимизировав при этом риск спектральной путаницы с другими категориями землепользования. Пространственная и временная динамика изменений, затрагивающих водотоки и поверхностные водоёмы, представлена в таблицах 14 и 15.

Анализ поверхностных водотоков и водоемов показывает постепенное сокращение их площади в Абиджане в период с 2000 по 2022 год. В 2000 году на территории площадью 210.90 км² поверхност-

Таблица 12

Развитие посадки леса и отсутствие посадки леса

Год	Посадка леса (км²)	Отсутствие посадки леса (км²)	Итого (км²)
2000	589.72	1517.73	2107.45
2017	464.33	1643.12	2107.45
2022	426.24	1681.21	2107.45

Таблица 13

Переходы посадки леса

Период	Посадка леса (км²)	Развитие (%)
с 2000 по 2017 год	-125.39	-21.26
с 2017 по 2022 год	-38.09	-8.20
с 2000 по 2022 год	-163.48	-27.72

Таблица 14

Развитие поверхностных водотоков и водоемов и отсутствие поверхностных водотоков и водоёмов

Год	Поверхностные водотоки и водоёмы (км²)	Отсутствие поверхностных водотоков и водоёмов (км²)	Итого (км²)
2000	210.90	1896.55	2107.45
2017	193.59	1913.86	2107.45
2022	150.89	1956.56	2107.45

Таблица 15

Переходы поверхностных водотоков и водоемов

Период	Площадь утраченных поверхностных водотоков и водоемов (км ²)	Развитие (%)
с 2000 по 2017 год	-17.31	-8.21
с 2017 по 2022 год	-42.70	-22.06
с 2000 по 2022 год	-60.01	-28.46

ные водотоки и водоемы занимали около 10.45%. Эта значительная доля водных ресурсов отражается в различных водотоках, которые характеризуют природный ландшафт юга Кот-д'Ивуара. В 2017 году площадь поверхностных водотоков и водоемов сократилась на 193.59 км², что соответствует снижению на 17.31 км² (8.21%) за 17 лет. В период с 2017 по 2022 год мы наблюдали сокращение площади на 42.70 км², что составляет 22.06% по сравнению с 2017 годом. Годовой темп утраты составляет 8.54 км². Это постепенное сокращение связано с ускоренной урбанизацией, которая приводит к засыпке водно-болотных угодий для расширения городских территорий. Такая динамика свидетельствует об уязвимости поверхностных водотоков и водоемов перед антропогенным воздействием в Абиджане.

Наконец, пространственная и временная динамика открытых грунтов представлена в таблицах 16 и 17, где показаны различные изменения в пределах нашего района исследования. Применение спектральных индексов NDSI, NDVI и NDBI к изображениям Landsat позволило нам точно наблюдать и оценивать различные изменения открытых земель с течением времени, а также наблюдать и анализировать их пространственное распределение в регионе Абиджана.

Временной анализ открытых грунтов, основанный на данных спутника Landsat, выявил контрастную двухфазную динамику в период с 2000 по 2022 год.

В 2000 году площадь незастроенных земель на всей территории исследования составляла 38.62 км², а в 2017 году сократилась до 15.93 км²,

что соответствует потере 22.69 км², или 58.75% за 17 лет, со средним темпом сокращения -1.34 км² в год. Затем, в период с 2017 по 2022 год, тенденция изменилась на противоположную, и площадь незастроенных земель увеличилась до 30.38 км², что соответствует приросту на 14.45 км² за пять лет. Эта динамика может быть связана с активизацией строительных работ, расширением карьеров, вырубкой лесов и расширением зон, подвергающихся урбанизации. Эти результаты показывают динамику, в которой открытые грунты играют двойную роль в качестве индикатора зон строительства и развития. Это свидетельствует о хрупкости открытых грунтов в условиях неконтролируемой динамики и практики землепользования.

Пространственно-временной анализ результатов выявил значительную пространственную динамику в пределах исследуемой территории. Быстрое расширение урбанизированных зон, особенно с 2017 года, отражает процесс ускоренной урбанизации района Абиджана. Эта урбанизация происходит в ущерб густым и вторичным лесам, поверхностным водотокам и водоемам, площади которых постепенно сокращаются. С другой стороны, наблюдается сокращение, а затем небольшое увеличение открытых грунтов на окраинах, вероятно, в связи с проектами городского благоустройства. Таким образом, можно сказать, что давление, оказываемое антропогенной деятельностью, является основным фактором трансформации землепользования в Абиджане.

Заключение

Разработанный метод, основанный на автоматизированном дешифрировании набора

Таблица 16

Развитие открытых грунтов и отсутствие открытых грунтов

Год	Открытые грунты (км ²)	отсутствие открытых грунтов (км ²)	Итого (км ²)
2000	38.62	2068.83	2107.45
2017	15.93	2091.52	2107.45
2022	30.38	2077.07	2107.45

Таблица 17

Переходы открытых грунтов

Период	Площадь утраченных открытых грунтов (км ²)	Развитие (%)
с 2000 по 2017 год	-22.69	-58.75
с 2017 по 2022 год	+14.45	+90.66
с 2000 по 2022 год	-8.24	- 21.34

многозональных снимков, позволил с высокой степенью достоверности (97.17%) определить состав земель и их изменения по сравнению с аналогичными работами других авторов, подтвердив тем самым надёжность методологии. Сочетание спектральных индексов с пороговыми значениями, определёнными для каждого класса, позволило точно классифицировать различные категории землепользования и более эффективно анализировать их пространственно-временную динамику. Предложенная методология, основанная на данных из открытых источников, может использоваться в других географических

регионах Африки.

Теоретические и экспериментальные результаты, полученные авторами, имеют большую практическую ценность. Различные карты землепользования, составленные в рамках нашего исследования, могут быть непосредственно использованы органами, ответственными за территориальное планирование, для более эффективного контроля за урбанизацией, в рамках мониторинга обезлесения с целью обеспечения его восстановления экологическими учреждениями, а также для реализации политики устойчивого управления.

Список литературы

1. Lambin E.F., Geist H.J., Lepers.E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2003. V. 28. Pp. 206-216.
2. Turner A.B.L., Meyer W.B., Skole D.L. Global Land-Use/Land-Change: Towards an Integrated Study. *Integr. Earth Syst. Sci.* 2009. V. 23. Pp. 91-95.
3. Ehlers E., Krafft T. (Eds.) *Earth System Science in the Anthropocene*. Springer: Berlin/Heidelberg. 2016. V. 53.
4. Steffen W., Sanderson A., Tyson P., Jäger J., Matson P., Moore B.III, Oldfield F., Richardson K., Schellnhuber H.-J., Turner B.L., Global Change and the Earth System: A Plane under Pressure; Springer: Berlin/Heidelberg. 2005.
5. Geist H.J., Lambin E.F. Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *Bioscience*. 2002. V. 52. Pp. 143-150.
6. Balogun I.A., Adeyewa D.Z., Balogun A.A., Morakinyo T.E. Analysis of Urban Expansion and Land Use Changes in Akure, Nigeria, Using Remote Sensing and Geographic Information System (GIS) Techniques. *Journal of Geography and Regional Planning*. 2011. V. 4. Pp. 533-541.
7. Ahmed H.A., Singh S.K., Kumar M. Impact of urbanization and land cover change on urban climate: Case study of Nigeria. *Urban Clim.* 2020. V. 32.
8. Abidjan офиц. сайт. URL: <https://www.liege.be/fr/vie-communale/services-communaux/international/jumelages-et-partenaires/abidjan-cote-divoire> (дата обращения: 18.11.2022).
9. Bio Y. K. A., Kouamé F. K., N'da D. H., Brou Y.T., Jofack Sokeng V.-C., Hauhouot A. C., Kouadio K., Kouamé J., Rudant J-P. Étude de la dynamique forestière du sud-ouest de la Côte d'Ivoire par télédétection optique (moyenne et haute résolution spatiale): contribution des images MODIS ET LANDSAT. 2ème Conférence Internationale GEOFORAFRI. 2016. V. 32.
10. Song C., Woodcock C.E., Seto K.C., Lenney Mary. P., Macomber S. A. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sens. Environ.* 2001. V. 75. Pp. 230-244.
11. Chalifoux S., Nastev M., Lamontagne C., Latifovic R. Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire Landsat en hydrogéologie. *Télédétection*. 2006. V. 6. Pp. 9-17.

References

1. Lambin E.F., Geist H.J., Lepers.E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2003. V. 28. Pp. 206-216.
2. Turner A.B.L., Meyer W.B., Skole D.L. Global Land-Use/Land-Change: Towards an Integrated Study. *Integr. Earth Syst. Sci.* 2009. V. 23. Pp. 91-95.
3. Ehlers E., Krafft T. (Eds.) *Earth System Science in the Anthropocene*. Springer: Berlin/Heidelberg. 2016. V. 53.
4. Steffen W., Sanderson A., Tyson P., Jäger J., Matson P., Moore B.III, Oldfield F., Richardson K., Schellnhuber H.-J., Turner B.L., Global Change and the Earth System: A Plane under Pressure; Springer: Berlin/Heidelberg. 2005.
5. Geist H.J., Lambin E.F. Proximate Causes and Underlying Driving Forces of Tropical Deforestation. *Bioscience*. 2002. V. 52. Pp. 143-150.
6. Balogun I.A., Adeyewa D.Z., Balogun A.A., Morakinyo T.E. Analysis of Urban Expansion and Land Use Changes in Akure, Nigeria, Using Remote Sensing and Geographic Information System (GIS) Techniques. *Journal of Geography and Regional Planning*. 2011. V. 4. Pp. 533-541.
7. Ahmed H.A., Singh S.K., Kumar M. Impact of urbanization and land cover change on urban climate: Case study of Nigeria. *Urban Clim.* 2020. V. 32.
8. Abidjan ofic. website. URL: <https://www.liege.be/fr/vie-communale/services-communaux/international/jumelages-et-partenaires/abidjan-cote-divoire> (date of request: 18.11.2022).
9. Bio Y. K. A., Kouamé F. K., N'da D. H., Brou Y.T., Jofack Sokeng V.-C., Hauhouot A. C., Kouadio K., Kouamé J., Rudant J-P. Étude de la dynamique forestière du sud-ouest de la Côte d'Ivoire par télédétection optique (moyenne et haute résolution spatiale): contribution des images MODIS ET LANDSAT. 2ème Conférence Internationale GEOFORAFRI. 2016. V. 32.
10. Song C., Woodcock C.E., Seto K.C., Lenney Mary. P., Macomber S. A. Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effects? *Remote Sens. Environ.* 2001. V. 75. Pp. 230-244.
11. Chalifoux S., Nastev M., Lamontagne C., Latifovic R. Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire Landsat en hydrogéologie. *Télédétection*. 2006. V. 6. Pp. 9-17.

**Сведения об авторах
Принадлежность к организации**

Ассех Куаме Фабрис

соискатель, кафедра космического мониторинга и экологии, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», 105064, Москва, Россия

Беленко Виктор Владимирович

[доктор технических наук](#), профессор, кафедра космического мониторинга и экологии, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», 105064, Москва, Россия

**Information about authors
Affiliations**

Asseh Kouame Fabrice

Applicant, Department of Space Monitoring and Ecology, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Belenko Viktor Vladimirovich

[Doctor of Technical Science](#), Professor, Head of the Department of Space Monitoring and Ecology, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 30.04.2026 г.

АНАЛИЗ ЦЕЛЕВОЙ АППАРАТУРЫ КА ДЗЗ ИЗ КОСМОСА И СООТВЕТСТВУЮЩИХ НАБОРОВ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ЗАСУХИ

Чумарев И.С., Беленко В.В.

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»,

105064, Москва, Россия

e-mail: ivan.chumarev@gmail.com

Статья посвящена выявлению ряда наборов пространственных данных ДЗЗ (дистанционного зондирования Земли) из космоса и соответствующих им наборов пространственных данных, применимых для выявления сельскохозяйственной засухи из номенклатуры существующих на орбите и планируемых к запуску космических аппаратов. С этой целью к анализируемой целевой аппаратуре (ЦА) выдвигается ряд технических критериев, поставленных в соответствие природным процессам, протекающим одновременно с сельскохозяйственной засухой или являющихся её факторами. Выбраны девять факторов, каждому из которых поставлен в соответствие количественный показатель, измеримый посредством целевой аппаратуры ДЗЗ из космоса. Каждый показатель охарактеризован с точки зрения требований по пространственному и временному разрешению, а также по продолжительности наблюдений. В результате идентифицировано 49 наборов пространственных данных, охарактеризованных по собственным пространственно-временным характеристикам, уровню тематической обработки, частоте обновления и доступности для загрузки.

Ключевые слова: сельскохозяйственная засуха, ДЗЗ из космоса, данные ДЗЗ из космоса, пространственные данные, целевая аппаратура, пространственно-временной анализ.

ANALYSIS OF SATELLITE REMOTE SENSING INSTRUMENTS AND CORRESPONDING GEOSPATIAL DATASETS FOR AGRICULTURAL DROUGHT DETECTION

Chumarev I.S., Belenko V.V.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

This article aims to identify satellite remote sensing instruments and the corresponding geospatial datasets applicable for detecting agricultural drought by analyzing remote sensing satellite missions, both in-orbit and planned. Several technical criteria are applied to the instruments under review, capturing natural processes that either coincide with agricultural drought or act as its driving factors. Nine factors influencing the onset and development of agricultural drought were selected, and each was put in correspondence with a quantitative indicator measurable by satellite remote sensing. Each indicator was then characterized in terms of the spatial and temporal resolution required, along with the duration of observations. As a result, 49 geospatial datasets were identified and characterized by their spatiotemporal properties, level of thematic processing, update frequency, and availability for public use.

Keywords: agricultural drought, satellite remote sensing, satellite data, geospatial data, remote sensing instruments, spatiotemporal analysis.

Введение

Сельскохозяйственная засуха характеризуется уменьшением влажности почвы, что приводит к стрессу растений, снижению биопродуктивности и урожая. Особенно тяжелые засухи до сих пор приводят к голоду и жертвам в некоторых регионах – по статистике Конвенции ООН по борьбе с опустыниванием, в 1970-2019 гг. от голода, вызванного засухой, погибли 650 тыс. человек.

По скорости развития засухи, в отличие от наводнений, пожаров и землетрясений, относятся к медленно развивающимся стихийным бедствиям и требуют продолжительных и систематических наблюдений. Получение сведений о засухе путем анализа данных, собранных посредством целевой аппаратуры (ЦА) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ из космоса) может позволить осуществлять выявление сельскохозяйственной засухи на заданном масштабе (от объектового до глобального), на регуляр-

ной основе (с частотой наблюдений от 30 минут до года и более), с опорой на архивные данные разной долгосрочности.

Статья преследует цель идентифицировать ЦА ДЗЗ из космоса, составить перечень соответствующих выдвинутым требованиям образцов этой аппаратуры и представить выборку наборов пространственных данных, подходящих для задачи выявления сельскохозяйственной засухи независимо от региона исследований, т.е. в глобальном масштабе. Данная задача решается посредством отслеживания ряда факторов, которые могут влиять на этот феномен или являться его показателями [1].

Предметом исследования являются совокупность наблюдаемых объектов и феноменов наземно-воздушной, почвенной, водной и организменной природных сред, различные факторы которых приведены в табл. 1 и взаимодействие между ними, а также технические характеристики, история эксплуатации и выходные продукты ЦА ДЗЗ из космоса.

Многие научные работы представляют перечни ЦА ДЗЗ, применяющейся в задачах выявления засухи различных типов, в т.ч. сельскохозяйственной засухи [2]. Их анализ показал, что номенклатура ЦА преимущественно составляется с опорой на цитирование научных работ и практику применения данных, а не исходя из технических характеристик де-факто функционирующих в мире систем ДЗЗ из космоса. Таким образом, перечень систем, упоминаемых в контексте поставленной задачи, ограничивается несколькими популярными наименованиями. Учитывая развертывание множества национальных и частных систем и комплексов ДЗЗ из космоса, задачей данной работы является исследование соответствия существующей номенклатуры ЦА ДЗЗ из космоса требованиям к задаче выявления сельскохозяйственной засухи посредством анализа изображений заданного временного и пространственного разрешений, характеризующихся актуальностью и приемлемой степенью доступности.

Материалы и методы исследования

База данных Всемирной метеорологической организации OSCAR, использованная в качестве основного источника информации, включает в себя 1160 уникальных профилей-описаний ЦА ДЗЗ из космоса, принадлежащих 77 государственным или частным организациям и функционировавших с 1960 по 2025 гг., а также планируемых к запуску вплоть до 2035 г. В нее включены все основные КА,

системы и комплексы ДЗЗ из космоса, использующиеся в гражданских целях. Привязка к теме метеорологии, являющейся основной тематикой сервиса OSCAR, позволяет производить предварительную оценку пригодности того или иного образца ЦА ДЗЗ из космоса для наблюдения того или иного фактора сельскохозяйственной засухи. Последовательность действий, составляющих данное исследование, приведено на рис. 1.

Разделение на этапы поиска ЦА и наборов пространственных данных, а также их подразделение на два типа по уровню обработки, позволяет проследить цепочку создания данных для анализа, идентифицируя ЦА и данные, не дошедшие до этапов производной и тематической обработки, но обладающие данным потенциалом. В случае ненахождения хотя бы одного набора данных для каждого рассматриваемого фактора, посредством экспертной оценки производится смягчение требований и повторная процедура поиска. Т.к. сельскохозяйственная засуха имеет свойство охватывать крупные регионы, а съемка посредством ЦА ДЗЗ из космоса имеет широкий охват, первоочередным было смягчение требований по пространственному разрешению. Во вторую очередь производилось смягчение требований по временному разрешению в силу невысокого темпа развития сельскохозяйственной засухи по сравнению с другими чрезвычайными ситуациями. Смягчение требований по продолжительности

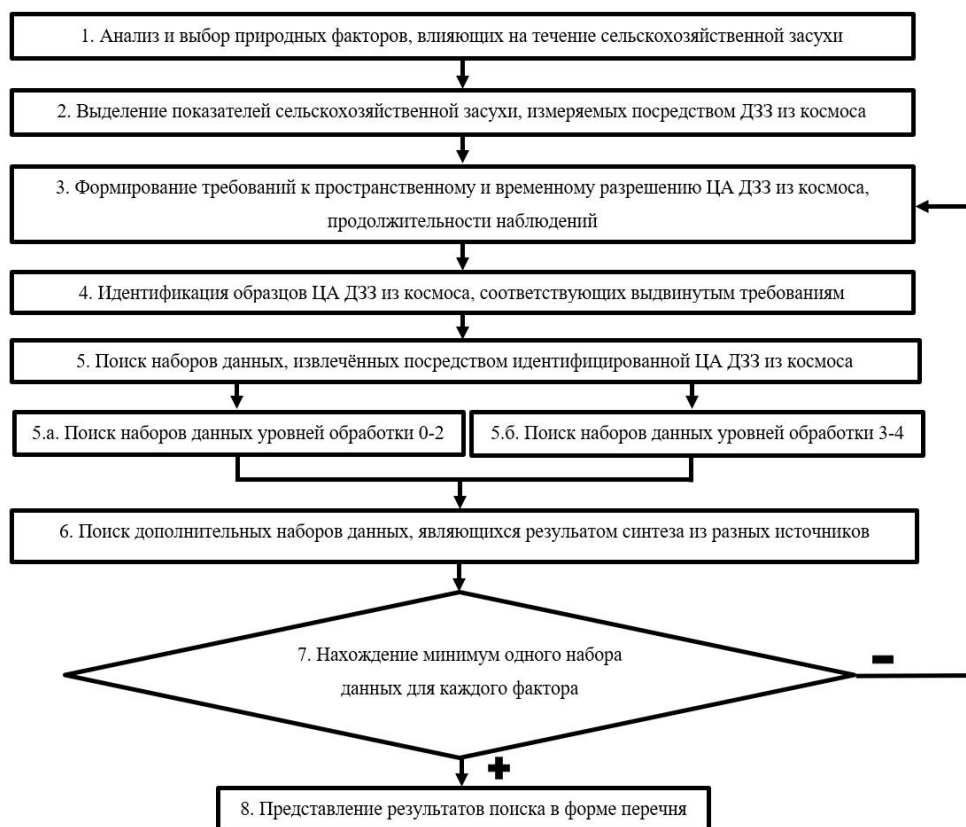


Рис. 1. Блок-схема поиска ЦА ДЗЗ из космоса и наборов пространственных данных для выявления сельскохозяйственной засухи

наблюдений производилось в последнюю очередь, т.к. многолетние средние значения исследуемых показателей являются ключевым аспектом корректной интерпретации их динамики, позволяя учитывать многолетние тенденции и климатические особенности исследуемой территории.

Помимо научных статей, при составлении статьи использовались нормативно-правовые документы (ГОСТ Р 59753-2021), отраслевые порталы (WMO OSCAR, eoPortal, Google Earth Engine Data Catalog, Remote Sensing Systems), материалы университетов и исследовательских институтов (Caltech, Jet Propulsion Laboratory, USGS), базы данных космических агентств и спутниковых операторов (Copernicus Land Service, ESA Climate Office, EUMETSAT, LP DAAC, NASA Earth Sciences, NOAA CLASS, NSOAS), отчеты международных организаций (Всемирной метеорологической организации, Конвенции Организации Объединенных Наций по борьбе с опустыниванием).

Анализ факторов, влияющих на течение сельскохозяйственной засухи

Факторы, наблюдаемые посредством ДЗЗ из космоса и влияющие на течение сельскохозяйственной засухи, либо являющиеся ее показателями, были выбраны путем анализа взаимодействий, происходящих в четырех природных средах: наземно-воздушной, водной, почвенной и организменной. Каждому фактору поставлен в соответствие один измеряемый количественный показатель. К наземно-воздушной среде отнесены атмосферные осадки, температура воздуха приземного слоя атмосферы и действительная эвапотранспирация. К водной среде – площадь поверхностных вод, общий объем вод, включая грунтовые воды, а также площадь снежного и ледникового покрова. К почвенной среде – свойства почвы и температура земной поверхности. К организменной среде – состояние растений, оцениваемое посредством индексов вегетации [3].

К дополнительным факторам и показателям, наблюдаемым посредством ДЗЗ, но не входящим в число исследуемых, относятся явления общей

циркуляции атмосферы, назначение и использование земель, интенсивность солнечной радиации и др. Выбранные факторы, влияющие на развитие сельскохозяйственной засухи, соответствующие им природные среды и выбранные измеряемые величины, являющиеся соответствующими факторам измеряемыми показателями, приведены в табл. 1. Показатели могут измеряться как абсолютные и относительные величины, т.е. в виде приближенного определения физических величин или безразмерных индексов.

Атмосферные осадки и температура воздуха оказывают определяющее значение на состояние экосистем и являются ведущим фактором, влияющим на их состояние и развитие, оказывая отложенное воздействие на большинство остальных факторов развития сельскохозяйственной засухи [4].

Действительная эвапотранспирация, т.е. суммарное испарение влаги с поверхностей элементов водной, почвенной и организменной сред в атмосфере, находится в положительной зависимости от нехватки почвенной влаги, и ее недостаток выступает в роли причины засух в условиях умеренного климата [5]. Измерения суммарной и потенциальной эвапотранспирации показали результаты для выявления и мониторинга засухи в региональном масштабе [6].

Влажность почвы – важнейшее свойство почв, изменение которой характеризует способность почв адаптироваться к метеорологическим условиям и обеспечивать корневое питание сельскохозяйственных растений [7].

Температура земной поверхности, измеряемая дистанционно, может характеризовать любой наземный объект, однако в контексте исследования засухи наибольшее значение имеет температура почвы и растительного покрова. Более высокие значения данного показателя могут указывать на сельскохозяйственную засуху в силу неспособности почвенной и организменной среды регулировать собственную температуру в условиях стресса, особенно в середине и конце периода вегетации [8].

Таблица 1

Классификация и индикаторы факторов, влияющих на развитие сельскохозяйственной засухи

№	Фактор развития сельскохозяйственной засухи	Показатель сельскохозяйственной засухи	Природная среда
1	Атмосферные осадки	сумма осадков	наземно-воздушная
2	Температура воздуха	температура воздуха	
3	Эвапотранспирация	действительная эвапотранспирация	
4	Влажность почвы	влажность почвы	почвенная
5	Температура земной поверхности	температура земной поверхности	
6	Площадь поверхностных вод	площадь зеркала водной поверхности	водная
7	Общий объем вод	Объем подземных вод	
8	Площадь снежного и ледникового покрова	площадь снежного и ледникового покрова	
9	Состояние и развитие растений	индексы вегетации	организменная

Количественный показатель площади поверхностных вод, а именно площадь зеркала водной поверхности, может служить для косвенной оценки сельскохозяйственной засухи. Ее маркером может послужить степень заполненности резервуаров, используемых в оросительных целях: чем большему стрессу подвержена сельскохозяйственная экосистема, тем больше водных ресурсов потребляется для его смягчения [9].

Подземные воды, в т.ч. грунтовые и артезианские воды, могут являться важным источником орошения, восполнения поверхностных водоемов и питания растений посредством корневой системы [3]. Фактору объема подземных вод соответствует величина общего объема вод на площади территории. Это обусловлено невозможностью прямого измерения объема подземных вод посредством ДЗЗ из космоса [10].

Степень влияния криосферы на состояние сельскохозяйственных угодий варьируется от региона к региону. В умеренных широтах, а также в горной и предгорной местности это влияние может становиться определяющим. Сельскохозяйственные территории предгорий питаются талой водой ледников в весенне-летний период, а измерение их динамики за зимний и ранневесенний период осуществляется посредством ДЗЗ из космоса [11].

Оценка состояния и развития растений осуществляется преимущественно посредством анализа индексов вегетации, вычисляемых по данным многоспектральной, гиперспектральной и микроволновой ЦА. Помимо исследования засух, данный подход активно применяется для мониторинга сельскохозяйственных культур [12].

Каждый фактор, влияющий на течение сельскохозяйственной засухи, анализируется на предмет пространственной и временной изменчивости и распределяется по категориям изменчивости, приведенным в табл. 2. В пространственном разрезе, т.е. по минимальному масштабу наблюдаемых изменений, вводятся следующие категории: объектовый, локальный, региональный. По временной изменчивости, т.е. по временным отрезкам, в которых наблюдаются существенные изменения каждого

фактора, вводится подразделение на внутрисуточные, внутрисеasonные, сезонные и долгосрочные. Категории масштабности продиктованы существующими стандартами категоризации спутниковых снимков по пространственному разрешению, а категории временной изменчивости введены в соответствии с периодизацией наблюдений популярных наборов пространственных данных, выпускаемых для периодов в 30 минут, 1 час, 12 часов, сутки, 8 дней, декада, 16 дней, месяц, год, и т.п. [13].

В качестве дополнительного критерия оценки образцов ЦА ДЗЗ из космоса и соответствующих им наборов пространственных данных вводится требование по продолжительности наблюдений, которые должны превышать десятилетний период, принятый за минимальный промежуток времени, на котором наблюдения можно считать долгосрочными. В отдельных случаях возможно совместное использование данных из разных источников при условии обеспечения их приемственности. Набор требований, выбранных для данного исследования с учетом описаний показателей сельскохозяйственной засухи, приведен в табл. 3.

Требования выдвигаются методом экспертной оценки, учитывая особенности задачи региональный контекст и вычислительные возможности. В итоге каждому искомому набору данных ДЗЗ из космоса соответствует требуемое пространственное разрешение (ПР), временное разрешение (ВР) и продолжительность непрерывных наблюдений. Выдвижение требований имеет целью структурировать поиск и оценить соответствие существующей номенклатуры ЦА ДЗЗ из космоса и соответствующих наборов данных решаемой задаче.

Наборы данных для анализа факторов наземно-воздушной среды

Исследование сельскохозяйственной засухи посредством анализа влияния на нее факторов наземно-воздушной среды может производиться посредством пяти групп ЦА и девяти соответствующих наборов данных, приведенных в табл. 4.

Сумма осадков. Набор данных GMI GPROF является основным продуктом ЦА GMI KA GPM Core Observatory уровня обработки 2, имеет

Таблица 2

Соответствие параметров факторов, влияющих на развитие сельскохозяйственной засухи требованиям к ЦА ДЗЗ из космоса и соответствующим им наборам данных

Параметр	Размерность параметра	Соответствующая характеристика данных ДЗЗ	Требование
Масштаб	объектовый	Пространственное разрешение	до 10 м
	локальный		от 10 до 1000 м
	региональный		от 1000 м до 10000 м
Временная изменчивость	внутрисуточная	Временное разрешение	менее 24 ч.
	внутридекадная		от 24 ч. до 10 дней
	сезонная		от 10 дней до вег. периода
	долгосрочная		более вег. периода

Таблица 3

Пример требований по временной изменчивости и масштабу изменений выбранных показателей сельскохозяйственной засухи

№	Показатель сельскохозяйственной засухи	Масштаб	ПР, м	Временная изменчивость	ВР	Продолжит. наблюдений
1	сумма осадков	объектовый	<10	внутридекадная	24 ч. – 10 дн.	≥10 лет
2	температура воздуха	региональный	1000-10000	внутридневная	<24 ч.	
3	действительная эвапотранспирация	объектовый	<10	внутридневная	<24 ч.	
4	влажность почвы	объектовый	<10	внутридекадная	24 ч. – 10 дн.	
5	температура земной поверхности	локальный	10-1000	внутридневная	<24 ч.	
6	площадь зеркала водной поверхности	локальный	10-1000	внутридекадная	24 ч. – 10 дн.	
7	общий объем вод	локальный	10-1000	внутридекадная	24 ч. – 10 дн.	
8	площадь снежного и ледникового покрова	объектовый	<10	внутридекадная	24 ч. – 10 дн.	
9	индексы вегетации	объектовый	<10	внутридекадная	24 ч. – 10 дн.	

Таблица 4

Наборы пространственных данных, применимые для выявления сельскохозяйственной засухи по факторам наземно-воздушной среды

Показатель сельскохозяйственной засухи	ЦА ДЗЗ из космоса	Данные уровней обработки 0-2	Данные уровней обработки 3-4
сумма осадков	GMI	GMI GPROF	IMERG GSMaP
температура воздуха	AIRS, AMSU	AIRS2RET	AIRS3STD
	AVHRR/3, HIRS, MSU, SSU	NOAA AVHRR GAC Level 2 Atmospheric Profiles	–
действительная эвапотранспирация	MODIS	–	MOD16A2, MYD16A2
	SMAP, SMOS, AMSR2, MODIS	–	GLEAM4

пространственное разрешение 0.1° (10 км на экваторе), характеризуется временным разрешением в 12-24 ч. и существует с 2014 г. Он составляет основу для расчета тематических наборов данных IMERG и GSMaP, являющимися синтезом по меньшей мере 10 единиц ЦА, в т.ч. вышедших из строя, например, TRMM. Наборы данных IMERG и GSMaP, составляемые агентствами NASA и JAXA соответственно, используются для расчета индексов осадков и их дефицитов, которые могут быть применены для самостоятельного анализа засухи, либо становятся вводными для моделей влажности почвы и гидрологических моделей [14]. Установленная на КА серии FengYun-3 ЦА MWRI (англ. Microwave Radiation Imager) может стать применимой при дальнейшем смягчении требований по пространственному разрешению, при соответствии требованиям по продолжительности наблюдений [15].

Температура воздуха. Температурные наборы данных ЦА AIRS и AMSU представляют измерения на различных уровнях атмосферного давления от 1 гПа до 1000 гПа, при идеальных условиях соответствующие нижней границе мезосферы и уровню моря [16]. Данные уровня 2 AIRS2RET имеют пространственное разрешение 45 км, а данные уровня 3 AIRS3STD – около 111 км. Данные AIRS применяются в процессе выявления засухи в проекте US

Drought Monitor, а также использовались для раннего выявления засухи [17]. Набор данных NOAA AVHRR GAC Level 2 Atmospheric Profiles, формируемый посредством ЦА AVHRR/3, HIRS, MSU и SSU, имеет пространственное разрешение 100 км на пиксель и отличается наиболее долгой продолжительностью наблюдений, включая непрерывные данные с 1979 г.

Действительная эвапотранспирация. Наборы данных MOD16A2 и MYD16A2, соответствующие КА Terra и Aqua, предоставляют средние восьмидневные значения действительной и потенциальной эвапотранспирации пространственного разрешения 500 м. Набор данных GLEAM4, вычисления которого основаны на физической модели Пенмана-Монтейта, предоставляет данные о действительной и потенциальной эвапотранспирации, а также более десяти дополнительных параметров. Он формируется с ежедневным временным шагом и имеет пространственное разрешение в 10 км на пиксель, но обновляется, как правило, один раз в год [18], что делает его использование невозможным для оперативного мониторинга.

Наборы данных для анализа факторов почвенной среды

Исследование сельскохозяйственной засухи посредством анализа факторов почвенной среды

возможно с опорой на пять групп ЦА и соответствующе им 18 наборов данных, приведенных в табл. 5.

Влажность почвы. Наборы данных ЦА SMAP и SMOS доступны для всей цепочки уровней обработки и используются для изучения влажности почвы, начиная с уровня обработки 2 [19]. Наборы данных SMAP уровней 3 и 4, а именно SPL3SMP_E/006 и SPL4SMGP/007, имеют пространственное разрешение 9 км и предоставляют оценки влажности почвы на поверхности (до 5 см) и зоне корней (до 1 м), соответственно [20]. Эти данные часто используются в сочетании с индексами вегетации, температурой земной поверхности и другими показателями засухи, а также служат входными данными для климатических моделей. Проект SMOS существует на пять дольше, чем SMAP. Выходные данные SMOS характеризуются пространственным разрешением в 35-50 км и 25 км для продуктов уровней обработки 2 и 3, соответственно. Достоверность данных SMAP в целом оценивается выше, чем SMOS, однако значительные улучшения были достигнуты с выходом набора данных SMOS-IC за счет дополнительного вычисления параметра оптической толщины растительности (англ. vegetation optical depth) и улучшенного алгоритма калибровки яркостных температур [7].

Набор данных SGD-SM 2.0 имеет 25-километровое пространственное разрешение, доступен с 2015 г. и обновляется ежедневно, аналогично продуктам уровней обработки 3 и 4 SMAP и SMOS. Он составляется посредством цепочки алгоритмов машинного обучения на основании данных радиолокационной ЦА WindSat и серии AMSR низкого пространственного разрешения. Валидационные исследования показали, что SGD-SM 2.0 не всегда соответствует данным SMAP и SMOS, однако представляет им альтернативу, выигрывает в аспекте географической непрерывности покрытия, и тем самым более применимы для глобальных исследований [21].

Температура земной поверхности. Наборы данных для отслеживания температуры земной поверхности MODIS и VIIRS используются для выявления засухи самостоятельно и в сочетании с другими

источниками данных – например, посредством индексов TCI, VHI, TVDI [22]. Они отличаются высокой степенью достоверности, пройдя многие этапы кросс-валидации между собой и с наблюдениями наземных метеорологических сетей [8]. Наблюдения MODIS и VIIRS более продолжительны, чем наблюдения SMAP и SMOS для влажности почвы, и отличаются гораздо более высоким пространственным разрешением, однако их непрерывность зависит от облачности.

Наборы данных VNP21A1D.002, VNP21A1N.002, MOD11A1, MYD11A1, MOD11A2 и MYD11A2 имеют пространственное разрешение 1 км на пиксель. Достоверность, соответствующих дневным и ночным наблюдениям, соответствует международному стандарту GCOS (англ. Global Climate Observing System); ночные наблюдения признаются более точными, особенно после долгосрочного усреднения. VNP21A1D.002, VNP21A1N.002, MOD11A1 и MYD11A1 предоставляют ежедневные значения температуры земной поверхности, а MOD11A2 и MYD11A2 – восьмидневные средние. Для проведения оперативного мониторинга, наборы данных ЦА MODIS, публикуемые через 1-2 сут. после зондирования, выгодно отличаются от ЦА VIIRS, для которой временной отрезок между сбором и публикацией данных о температуре земной поверхности может достигать 1-2 месяцев [8].

Наборы данных для анализа факторов водной среды

Для анализа влияния факторов водной среды на развитие сельскохозяйственной засухи были идентифицированы 20 наборов данных, производимых посредством семи единиц ЦА или их комбинаций, представленных в табл. 6.

Площадь зеркала водной поверхности. Площадь водных объектов – параметр, отслеживаемый значительным количеством ЦА и имеющий максимальное число соответствующих наборов данных благодаря разнообразию способов выявления воды дистанционными методами, в т.ч. посредством несложных операций со спектральными каналами синего и ближнего инфракрасного каналов [23]. Данные китайской ЦА CZI уровней обработки 1-2,

Таблица 5

Наборы пространственных данных, применимые для выявления сельскохозяйственной засухи по факторам почвенной среды

Показатель сельскохозяйственной засухи	ЦА ДЗЗ из космоса	Данные уровней обработки 0-2	Данные уровней обработки 3-4
влажность почвы	SMAP	SPL1BTB SPL2SMP	SPL3SMP_E/006 SPL4SMGP/007
	SMOS	L2 SM, SMOS-IC	L3 Daily SM/TB
	AMSR-E, AMSR2, Windsat	–	SGD-SM 2.0
температура земной поверхности	VIIRS	VNP09GA VNP09H1	VNP21A1D.002 VNP21A1N.002
	MODIS	MOD11_L2 MYD11_L2	MOD11A1, MYD11A1 MOD11A2, MYD11A2

Таблица 6

Наборы пространственных данных, применимые для выявления сельскохозяйственной засухи по факторам водной среды

Показатель сельскохозяйственной засухи	ЦА ДЗЗ из космоса	Данные уровней обработки 0-2	Данные уровней обработки 3-4
<i>площадь зеркала водной поверхности</i>	CZI	Портал NSOAS	–
	MODIS	MOD09GQ MYD09GQ MOD09Q1 MYD09Q1 MOD09A1 MYD09A1	MOD09GA MYD09GA MOD28C2
	VIIRS	VNP09GA VNP09A1	VNP28C2
	MSI, OLI, OLI2	–	OPERA DSWxHLS
	OLI, TM, ETM+	–	GSWE
<i>общий объём вод</i>	MWI (GRACE-FO)	–	GRACE/GRACE-FO Level 3 Total Water Storage Anomalies (TWSA)
<i>площадь снежного и ледникового покрова</i>	MSI	S2MSI2A S2_SR	COPERNICUS/S2_SNOW

представляющие излучательную яркость на верхней границе атмосферы и отражательную способность земной поверхности соответственно, доступны для загрузки на портале Национального центра спутникового океановедения Китая NSOAS. Они имеют пространственное разрешение 50 м и прошли валидацию при исследованиях водных объектов на территории Китая [24].

Наборы данных ЦА MODIS серии MOD09 и MYD09 включают отражательную способность поверхности в диапазонах, необходимых для расчета индексов NDWI и различаются по пространственному (от 250 м до 500 м) и временному (ежедневные и восьмидневные) разрешениям. Расчет индекса MNDWI, задействующего коротковолновой инфракрасный диапазон, также возможен посредством всех наборов данных этой серии, за исключением характеризующихся наиболее высоким пространственным разрешением MOD09GQ и MYD09GQ [23]. Публикуясь с минимальной задержкой, эти данные могут служить основой для оперативного мониторинга площади поверхностных вод.

При смягчении требований по пространственному разрешению с локального масштаба до регионального, возможно использование наборов данных VNP28C2 и MOD28C2, получаемых посредством ЦА VIIRS и MODIS, соответственно. Они используются для отслеживания площади, уровня и объема поверхностных вод с 8-дневной периодичностью. Набор данных ЦА VIIRS составляется с использованием более совершенного алгоритма и имеет более высокое пространственное разрешение в 375 м, чем MOD28C2 (500 м). Ежегодно формируется глобальная карта водных объектов MOD44W, доступная для всей продолжительности функционирования КА Aqua и Terra.

В рамках проекта OPERA DSWx генерируются два набора данных, DSWx-S1 группировки КА

Sentinel-1 и DSWx-HLS, представляющий собой совместные данные группировки Sentinel-2 и КА Landsat 8 и Landsat 9. DSWx-HLS отличается более частой обновляемостью в 2-4 сут. по сравнению с 6-12 сут., необходимыми для повторного пролета Sentinel-1, при равных пространственных разрешениях в 30 м. DSWx-HLS в целом характеризуется несколько высшей точностью [25].

Набор данных GSWE, сформированный по наблюдениям КА Landsat 4,5,7,8 и 9, формируется с 1984 г. и включает данные о заполненности пикселя водными объектами с различной степенью вероятности. Он имеет пространственное разрешение в 30 м для всего срока наблюдений и обновляется каждые 8 дней при штатной работе КА Landsat 8 и 9.

Общий объём вод. Набор данных GRACE/GRACE-FO Level 3 Total Water Storage Anomalies (TWSA) имеет пространственное разрешение 1 град. (111 км у экватора) и временное 1 мес. Данные проходят обработку, преобразуясь из сферических гармонических коэффициентов гравитационного поля Земли или данных о массовой концентрации уровня обработки 2, что обуславливает их задержку на 2-4 мес. и невозможность применения для оперативного мониторинга. Данные миссии GRACE-FO доступны с 2018 г. и могут использоваться совместно с данными изначальной миссии GRACE для увеличения продолжительности наблюдений до 2002 г. за исключением периода с июля 2017 г. по июнь 2018 г. между выводом из эксплуатации пары КА GRACE и запуском миссии GRACE-FO [15].

Площадь снежного и ледникового покрова. Наборы данных, применяемые для отслеживания текущей линии снежного покрова, включают в себя различные продукты MODIS, набор данных GMSI, составляемый посредством ЦА AVHRR, AMSR2, GMI спутников MetOp-B, MetOp-C, GCOM-W, GPM. Данные обновляются ежеднев-

но, однако предоставляются с задержкой на один год и имеют пространственное разрешение 2-4 км. Продукты MOD10A1, MYD10A1 ЦА MODIS обладают схожими временным разрешением, максимальным пространственным разрешением 500 м на пиксель и становятся доступными в течение суток или нескольких дней. Наборы данных группировки Sentinel-2, а именно S2MSI2A и S2_SR, характеризуются одинаковыми пространственным и временным разрешением в 10 м и 5 сут. Различия между ними ограничиваются методами распространения: S2MSI2A доступен к загрузке посредством тайлов, а S2_SR распространяется через платформу Google Earth Engine. Набор данных COPERNICUS/S2_SNOW предоставляет процентную долю снежного покрова. Анализ динамики снежного покрова редко используется в исследованиях сельскохозяйственной засухи, однако успехи в повышении достоверности данных для разных регионов создает предпосылки для использования этих данных [26].

Наборы данных для анализа факторов организменной среды

Номенклатура индексов вегетации, используемых для оценки состояния и развития растительности, чрезвычайно широка. ВМО рекомендует к четырем из них, а именно EVI (англ. Enhanced Vegetation Index), NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index), VCI (англ. Vegetation Condition Index) и VHI (англ. Vegetation Health Index), являющийся составным индексом [1,27]. В табл. 7 приведены три набора данных, применимых для выявления сельскохозяйственной засухи по факторам организменной среды посредством вычисления индексов вегетации. Все они производятся посредством ЦА MSI КА серии Sentinel-2.

10-дневные композитные изображения индекса NDVI, имеющие пространственное разрешение 10 м на пиксель, распространяются с задержкой в 3-5 сут. и могут быть использованы для оперативного ежедневного мониторинга растительности [28]. При смягчении требований по пространственному разрешению, могут использоваться многочисленные наборы данных ЦА MODIS, VIIRS и AVHRR, а именно MCD19A3CMG и продукты серии MOD13 (для индекса NDVI), VNP13A1 и VNP16 (для индексов TCI, VCI, VHI), GIMMS NDVI3g+. Все вышеперечисленные наборы данных имеют уровень обработки L3, пространственное разрешение от 250 м до 8 км, временное разрешение от суток до 16 дней [13].

Заключение

Была проанализирована база из более чем 1100 ЦА ДЗЗ из космоса на предмет соответствия требованиям, выдвинутому по девяти параметрам, используемым в качестве показателей сельскохозяйственной засухи, в целях идентификации наборов данных для ее выявления. По результатам поиска, было идентифицировано 19 наборов данных для факторов водной среды, 18 – для факторов почвенной среды, девять – для факторов наземно-воздушной среды, три – для факторов организменной среды.

Изобилие спутниковых систем ДЗЗ из космоса не транслируется в желаемое многообразие наборов спутниковых данных, применимых для эффективного мониторинга и изучения природных процессов, в частности для изучения сельскохозяйственной засухи.

Для того, чтобы запуск новых спутников ДЗЗ приводил к появлению применимых для анализа различных процессов, проходящих на Земле, эти данные должны удовлетворять нижеуказанным требованиям, пройдя соответствующие стадии:

1. Пространственно непрерывное и периодическое покрытие области интереса;
2. Качественная предварительная обработка данных;
3. Тематическая обработка данных и приведение их к формату данных, готовых для анализа (ARD, англ. analysis-ready data);
4. Наличие механизмов, способствующих оперативному получению данных.

Частота покрытия области интереса может варьироваться, однако требования по заданной периодичности первостепенны в силу того, что засуха является медленно развивающимся природным процессом. Вопрос покрытия определяется наличием на околоземной орбите единиц ЦА КА ДЗЗ из космоса с определенными техническими характеристиками. В отношении научных исследований, таких, как выявление сельскохозяйственной засухи, последний пункт в современных условиях предполагает открытое и бесплатное распространение данных. Данные могут стать инструментом для выявления сельскохозяйственной засухи только при соблюдении всех вышеперечисленных условий, из чего может вытекать дальнейшее обсуждение достоверности и качества анализа.

Последующими задачами, выполнение которых необходимо для разработки алгоритма выявления

Таблица 7

Наборы пространственных данных, применимые для выявления сельскохозяйственной засухи по факторам организменной среды

Показатель сельскохозяйственной засухи	ЦА ДЗЗ из космоса	Данные уровней обработки 0-2	Данные уровней обработки 3-4
<i>состояние и развитие растительности</i>	MSI	S2MSI2A S2_SR	COPERNICUS/S2_NDVI

сельскохозяйственной засухи посредством ДЗЗ из космоса являются:

- анализ существующих методов выявления сельскохозяйственной засухи, их оценка;
- многокритериальный анализ соответствующих выбранным на данном этапе системам наборов пространственных данных, включая специализированные тематические продукты;

– сбор и анализ лучших практик картографического обеспечения для наглядного представления феномена засухи;

– разработка и реализация алгоритма выявления сельскохозяйственной засухи посредством анализа данных ДЗЗ из космоса;

– верификация предлагаемой методики посредством анализа выходных результатов.

Список литературы

1. Свобода М., Фукс Б. Справочник по показателям и индексам засушливости ВМО. Женева: Всемирная метеорологическая организация. Integrated Drought Management Programme. 2016. 60 с.
2. Mullapudi A., Vibhute A.D., Mali S. et al. A review of agricultural drought assessment with remote sensing data: methods, issues, challenges and opportunities. *Applied Geomatics*. 2022. 13 p. DOI: 10.1007/s12518-022-00484-6.
3. Горышина Т.К. Экология растений: учебное пособие. Москва: Высшая школа. 1979. 368 с.
4. You Z., Sun X., Sun H. et al. Mechanisms of meteorological drought propagation to agricultural drought in China: insights from causality chain. *Natural Hazards*. 2025. V. 2. No. 1. 15 p. DOI: 10.1038/s44304-025-00073-8.
5. Hong S., Deng H., Zheng Z. et al. The influence of variations in actual evapotranspiration on drought in China's Southeast River basin. *Scientific Reports*. 2023. 13 p. DOI: 10.1038/s41598-023-48663-8.
6. Zheng C., Jia L., Hu G. Global land surface evapotranspiration monitoring by ETMonitor model driven by multi-source satellite earth observations. *Journal of Hydrology*. 2022. V. 613. Part B. 21 p. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128444.
7. Fernandez-Moran R., Al-Yaari A., Mialon A. et al. SMOS-IC: An Alternative SMOS Soil Moisture and Vegetation Optical Depth Product. *Remote Sensing*. 2017. V. 9. No. 5. Article 457. 21 p. DOI: 10.3390/rs9050457.
8. Hulley G.C., Freepartner R., Islam T. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Land Surface Temperature and Emissivity Product (VNP21) User Guide. NASA GSFC. 2023. 37 p. URL: https://viirsland.gsfc.nasa.gov/PDF/VNP21_LSTE_user_guide.pdf.
9. Vicente-Serrano S.M., Gouveia C., Camarero J.J. et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2013. V. 110. No. 1. Pp. 52-57. DOI: 10.1073/pnas.1207068110.
10. Adams K.H., Reager J.T., Rosen P. et al. Remote sensing of groundwater: Current capabilities and future directions. *Water Resources Research*. 2022. V. 58. No. 10. 27 p. DOI: 10.1029/2022WR032219.
11. Северский И.В. Динамика горной криосферы Балкаш-Алакольского бассейна. Алматы: Институт географии. 2017. 109 с. URL: <https://ingeo.kz/?p=6417> (дата обращения: 02.02.2026).
12. Середа И.И., Денисов П.В., Трошко К.А. и др. Уникальные условия развития озимых культур, наблюдаемые по данным спутникового мониторинга на европейской территории России в октябре 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. №5. С. 304-310. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-304-310.
13. Li M., Cao S., Zhu Z. et al. Spatiotemporally consistent global dataset of the GIMMS Normalized Difference Vegetation Index (PKU GIMMS NDVI) from 1982 to 2022. *Earth System Science Data*. 2023. V. 15. No. 9. Pp. 4181-4203. DOI: 10.5194/essd-15-4181-2023.
14. Ramesh K., Arivudai Nambi A., Ramya R. et al. Evaluation of SPI and Rainfall Departure Based on Multi-Satellite Precipitation Products for Meteorological Drought Monitoring in Tamil Nadu. *Water*. 2023. V. 15. No. 7. Article 1435. 25 p. DOI: 10.3390/w15071435.
15. Всемирная метеорологическая организация. Observing Systems Capability Analysis and Review Tool. URL: <https://space.oscar.wmo.int/> (дата обращения: 12.01.2026).
16. Gao W., Zhao F., Xu Y., Feng X. Validation of the Surface Air Temperature Products Retrieved from the Atmospheric Infrared Sounder Over China. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008. V. 46. No. 6. Pp. 1783-1789. DOI: 10.1109/TGRS.2008.916640.
17. Behrangi A., Fetzner E.J., Granger S. Early detection of drought onset using near surface temperature and humidity observed from space. *International Journal of Remote Sensing*. 2016. V. 37. No. 16. Pp. 3911-3923. DOI: 10.1080/01431161.2016.1204478.
18. Miralles D.G., Bonte O., Koppa A. et al. GLEAM4: global land evaporation and soil moisture dataset at 0.1° resolution from 1980 to near present. *Scientific Data*. 2025. V. 12. Article 416. 14 p. DOI: 10.1038/s41597-025-04610-y.
19. Mladenova I.E., Bolten J.D., Crow W. et al. Agricultural Drought Monitoring via the Assimilation of SMAP Soil Moisture Retrievals into a Global Soil Water Balance Model. *Frontiers in Big Data*. 2020. V. 3. Article 10. 16 p. DOI: 10.3389/fdata.2020.00010.
20. Zhu L., Tian G., Wu H. et al. Moisture Product and its Application in Agriculture. *Remote Sensing*. 2024. V. 16. No. 7. Article 1225. DOI: 10.3390/rs16071225.
21. Jiang Z., Pan M., Wang T. et al. Seamless global daily soil moisture mapping using deep learning based spatiotemporal fusion. *Environmental Modelling & Software*. 2025. V. 172. Article 105950. 13 p. DOI: 10.1016/j.envsoft.2024.105950.
22. Щербенко Е.В. Дистанционные методы выявления сельскохозяйственной засухи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. №2. С. 408-419.
23. Li J., Ma R., Cao Z., Zhu Z. et al. Satellite Detection of Surface Water Extent: A Review of Methodology. *Water*. 2022. V. 14. Article 1148. 18 p. DOI: 10.3390/w14071148.
24. Zhang F.F., Li J.S., Wang C. et al. Multitype inland water atmospheric correction and water quality estimation based on HY-1C CZI images. *National Remote Sensing Bulletin*. 2023. V. 27. No. 1. Pp. 79-91. DOI: 10.11834/jrs.20235010.
25. Jung J., Fattahi H., Jeong S. et al. Towards Global Mapping of Dynamic Surface Water Extents Using Sentinel-1 SAR Data: Preprint. SSRN. 2025. 36 p. DOI: 10.2139/ssrn.5134349.
26. Gascoin S., Grizonnet M., Bouchet M. et al. Theia Snow collection: high-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Earth System Science Data*. 2019. V. 11. Pp. 493-514. DOI: 10.5194/essd-11-493-2019.
27. Kogan F.N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*. 1995. V. 15. No. 11. Pp. 91-100. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00079-T.
28. Descals A., Torres K., Verger A., Penuelas J. Evaluating Sentinel-2 for Monitoring Drought-Induced Crop Failure in Winter Cereals. *Remote Sensing*. 2025. V. 17. Article 340. DOI: 10.3390/rs17020340.

References

1. Svoboda M., Fuchs B. *Spravochnik po pokazatelyam i indeksam zasushlivosti VMO* [WMO Handbook of Drought Indicators and Indices]. Geneva: World Meteorological Organization. Integrated Drought Management Programme. 2016. 60 p.
2. Mullapudi A., Vibhute A.D., Mali S. et al. A review of agricultural drought assessment with remote sensing data: methods, issues, challenges and opportunities. *Applied Geomatics*. 2022. 13 p. DOI: 10.1007/s12518-022-00484-6.
3. Goryshina T.K. *Ekologiya rasteniy: uchebnoye posobiye* [Plant Ecology: A Textbook]. Moscow: Higher School. 1979. 368 p.
4. You Z., Sun X., Sun H. et al. Mechanisms of meteorological drought propagation to agricultural drought in China: insights from causality chain. *Natural Hazards*. 2025. V. 2. No. 1. 15 p. DOI: 10.1038/s44304-025-00073-8.
5. Hong S., Deng H., Zheng Z. et al. The influence of variations in actual evapotranspiration on drought in China's Southeast River basin. *Scientific Reports*. 2023. 13 p. DOI: 10.1038/s41598-023-48663-8.
6. Zheng C., Jia L., Hu G. Global land surface evapotranspiration monitoring by ETMonitor model driven by multi-source satellite earth observations. *Journal of Hydrology*. 2022. V. 613. Part B. 21 p. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128444.
7. Fernandez-Moran R., Al-Yaari A., Mialon A. et al. SMOS-IC: An Alternative SMOS Soil Moisture and Vegetation Optical Depth Product. *Remote Sensing*. 2017. V. 9. No. 5. Article 457. 21 p. DOI: 10.3390/rs9050457.
8. Hulley G.C., Freepartner R., Islam T. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Land Surface Temperature and Emissivity Product (VNP21) User Guide. NASA GSFC. 2023. 37 p. URL: https://viirsland.gsfc.nasa.gov/PDF/VNP21_LSTE_user_guide.pdf.
9. Vicente-Serrano S.M., Gouveia C., Camarero J.J. et al. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2013. V. 110. No. 1. Pp. 52-57. DOI: 10.1073/pnas.1207068110.
10. Adams K.H., Reager J.T., Rosen P. et al. Remote sensing of groundwater: Current capabilities and future directions. *Water Resources Research*. 2022. V. 58. No. 10. 27 p. DOI: 10.1029/2022WR032219.
11. Seversky I.V. *Dinamika gornoy kriosfery Balkash-Alakol'skogo basseyina* [Dynamics of the mountain cryosphere of the Balkhash-Alakol basin]. Almaty: Institute of Geography. 2017. 109 p. URL: <https://ingeo.kz/?p=6417> (date of access: 02.02.2026).
12. Sereda I.I., Denisov P.V., Troshko K.A. et al. Unique conditions for winter crop development observed using satellite monitoring data in the European territory of Russia in October 2020. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. V. 17. No. 5. Pp. 304-310. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-304-310.
13. Li M., Cao S., Zhu Z. et al. Spatiotemporally consistent global dataset of the GIMMS Normalized Difference Vegetation Index (PKU GIMMS NDVI) from 1982 to 2022. *Earth System Science Data*. 2023. V. 15. No. 9. Pp. 4181-4203. DOI: 10.5194/essd-15-4181-2023.
14. Ramesh K., Arivudai Nambi A., Ramya R. et al. Evaluation of SPI and Rainfall Departure Based on Multi-Satellite Precipitation Products for Meteorological Drought Monitoring in Tamil Nadu. *Water*. 2023. V. 15. No. 7. Article 1435. 25 p. DOI: 10.3390/w15071435.
15. World Meteorological Organization. Observing Systems Capability Analysis and Review Tool. URL: <https://space.oscar.wmo.int/> (date of access: 12.01.2026).
16. Gao W., Zhao F., Xu Y., Feng X. Validation of the Surface Air Temperature Products Retrieved from the Atmospheric Infrared Sounder Over China. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008. V. 46. No. 6. Pp. 1783-1789. DOI: 10.1109/TGRS.2008.916640.
17. Behrangi A., Fetzer E.J., Granger S. Early detection of drought onset using near surface temperature and humidity observed from space. *International Journal of Remote Sensing*. 2016. V. 37. No. 16. Pp. 3911-3923. DOI: 10.1080/01431161.2016.1204478.
18. Miralles D.G., Bonte O., Koppa A. et al. GLEAM4: global land evaporation and soil moisture dataset at 0.1° resolution from 1980 to near present. *Scientific Data*. 2025. V. 12. Article 416. 14 p. DOI: 10.1038/s41597-025-04610-y.
19. Mladenova I.E., Bolten J.D., Crow W. et al. Agricultural Drought Monitoring via the Assimilation of SMAP Soil Moisture Retrievals into a Global Soil Water Balance Model. *Frontiers in Big Data*. 2020. V. 3. Article 10. 16 p. DOI: 10.3389/fdata.2020.00010.
20. Zhu L., Tian G., Wu H. et al. Moisture Product and its Application in Agriculture. *Remote Sensing*. 2024. V. 16. No. 7. Article 1225. DOI: 10.3390/rs16071225.
21. Jiang Z., Pan M., Wang T. et al. Seamless global daily soil moisture mapping using deep learning based spatiotemporal fusion. *Environmental Modelling & Software*. 2025. V. 172. Article 105950. 13 p. DOI: 10.1016/j.envsoft.2024.105950.
22. Shcherbenko E.V. Remote methods for detecting agricultural drought. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2007. V. 4. No. 2. Pp. 408-419.
23. Li J., Ma R., Cao Z., Zhu Z. et al. Satellite Detection of Surface Water Extent: A Review of Methodology. *Water*. 2022. V. 14. Article 1148. 18 p. DOI: 10.3390/w14071148.
24. Zhang F.F., Li J.S., Wang C. et al. Multitype inland water atmospheric correction and water quality estimation based on HY-1C CZI images. *National Remote Sensing Bulletin*. 2023. V. 27. No. 1. Pp. 79-91. DOI: 10.11834/jrs.20235010.
25. Jung J., Fattahi H., Jeong S. et al. Towards Global Mapping of Dynamic Surface Water Extents Using Sentinel-1 SAR Data: Preprint. SSRN. 2025. 36 p. DOI: 10.2139/ssrn.5134349.
26. Gascoin S., Grizonnet M., Bouchet M. et al. Theia Snow collection: high-resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Earth System Science Data*. 2019. V. 11. Pp. 493-514. DOI: 10.5194/essd-11-493-2019.
27. Kogan F.N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*. 1995. V. 15. No. 11. Pp. 91-100. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00079-T.
28. Descals A., Torres K., Verger A., Penuelas J. Evaluating Sentinel-2 for Monitoring Drought-Induced Crop Failure in Winter Cereals. *Remote Sensing*. 2025. V. 17. Article 340. DOI: 10.3390/rs17020340.

**Сведения об авторах
Принадлежность к организации**

Чумарев Иван Сергеевич

соискатель, Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия

Беленко Виктор Владимирович

доктор технических наук, профессор, Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия

**Information about authors
Affiliations**

Chumarev Ivan Sergeevich

Applicant, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Belenko Viktor Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 18.05.2026 г.

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСОВ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

^{1,2}Саченок Д.А., ¹Туманян К.

¹*Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
119049, Москва, Россия*

²*Всероссийский научно-исследовательский институт труда, 105043, Москва, Россия
e-mail: ave.daniil@yandex.ru*

Использование данных дистанционного спутникового зондирования позволяет производить решения множества прикладных задач в рамках различных наук и имеет преимущества перед рядом традиционных методов исследований. Отдельно выделяются получаемые посредством расчетов показатели вегетационных индексов, они подходят для мониторинга экологической, пожарной, геологической, сельскохозяйственной ситуации в изучаемых регионах. Однако применение комплексов, состоящих из нескольких вегетационных индексов в основном используется в геологических и сельскохозяйственных исследованиях, в экологических изысканиях данная методология встречается значительно реже, не смотря на ее эффективность. В статье приводится обоснование и систематизация применения комплекса из нескольких вегетационных индексов в рамках осуществления ряда экологических исследований. Приведенные экологические задачи и подходы к их решению на основе вегетационных индексов позволяют проводить, как прямые исследования, так и осуществлять валидацию данных, получаемых иными методами.

Ключевые слова: экология, дистанционное спутниковое зондирование, вегетационные индексы, экологический мониторинг, совершенствование методологии.

JUSTIFICATION OF THE USE OF VEGETATION INDEX COMPLEXES FOR ENVIRONMENTAL MONITORING TASKS

^{1,2}Sachenok D.A., ¹Tumanian C.

¹*National University of Science and Technology MISIS, 119049, Moscow, Russia*

²*All-Russian Research Institute of Labor, 105043, Moscow, Russia*

The use of remote satellite sensing data allows the solution of many applications in various sciences and has advantages over a number of traditional research methods. Indicators of vegetation indices obtained through calculations are separately distinguished, they are suitable for monitoring the ecological, fire, geological, agricultural situation in the studied regions. However, the use of complexes consisting of several vegetation indices is mainly used in geological and agricultural research, in environmental surveys this methodology is much less common, despite its effectiveness. The article provides justification and systematization of the use of a complex of several vegetation indices as part of a number of environmental studies. The given environmental problems and approaches to their solution on the basis of vegetation indices make it possible to conduct both direct research and validate data obtained by other methods.

Keywords: ecology, remote satellite sensing, vegetation indices, environmental monitoring, methodology improvement.

Введение

Дистанционное спутниковое зондирование является одним из передовых инструментов различных исследований Земли, находящимся на пересечении наук. Получаемыми данными посредством данного метода являются снимки и видеозаписи высокого разрешения. Конечным продуктом обработки снимков является построение различного рода карт и расчет вегетационных индексов (ВИ).

Вегетационные индексы применяются в мире при решении спектра задач, связанных с сельским хозяйством, геологией, геодезией, экологией, природоохранными мероприятиями. В экологических исследованиях в данный момент, методы, использующие вегетационные индексы представлены в наименьшей степени, однако их эффективность остается на высоком уровне.

В структуре и математическом смысле каждого отдельно взятого индекса существуют различного

рода параметры отклонения (атмосферные помехи, влажность, особенности растительности) и фокусировка под один конкретный вид задачи (оценивание состояния низкорослой растительности, леса, оценивание состояние водных объектов, оценивание эффективности сельскохозяйственных мероприятий). В этой связи показатели одного вегетационного индекса могут показывать неточности, особенно, если задача, решаемая посредством подобных расчетов многоуровневая.

Целью исследования является обоснование применения комплексов вегетационных индексов для проведения специфических видов экологических исследований.

Задачами исследования, необходимыми для достижения поставленной цели являются:

– Формулирование основных экологических задач, решаемых посредством метода комплексного применения вегетационных индексов.

- Анализ преимуществ применения вегетационных индексов совокупно с существующими методами мониторинга в экологии.

- Анализ критериев выбора вегетационных индексов для различного рода задач экологического мониторинга.

- Приведение вариантов комплексов вегетационных индексов и рассмотрение их прикладных возможностей.

Задачи экологического мониторинга, решаемые посредством комплексного применения вегетационных индексов

Основой задач экомониторинга является оценивание различных форм антропогенного воздействия на окружающую среду. В рамках проводимого исследования основное внимание следует уделить конечному результату этого оценивания, под который подбирается инструментарий. Этот результат может быть, как четко сформированной исследовательской задачей, так и валидацией уже имеющихся данных посредством дополнительных исследований.

Валидацию следует рассматривать в сочетании с имеющимися данными, в таком случае она будет разделена на валидацию, подтверждающую количественные данные и валидацию, подтверждающую качественные данные.

В первом случае метод дистанционного зондирования будет связан с численными показателями, в имеющихся условиях эти показатели получаются посредством замеров и лабораторных методов. Нормирование показателей указывается в нормативных правовых актах Российской Федерации. Валидация предельных показателей (ПДУ, ПДК, ПДС) посредством вегетационных индексов заключается в оценивании реакции растительности на подтвержденное антропогенное воздействие, что является основным принципом метода биоиндикации [1]. В данном случае работает взаимосвязь: считывание качественного состояния растительности посредством ВИ – сравнение с численными показателями. Взаимосвязь позволяет утверждать о соответствии или не соответствии антропогенного воздействия нормативам.

Во втором случае, вегетационные индексы выполняют валидирующую функцию в связи со значительно большими масштабами территории, которые возможно изучить [2]. Как правило качественные показатели состояния окружающей среды собираются методами различного наблюдения. В случае прямого наблюдения человеком, любая гипотеза наблюдателя за ограниченным пространством может быть подтверждена с другого масштаба, а в случае наблюдения посредством съемки с высоты, в том числе с орбиты, но без обработки ВИ, метод позволяет подтвердить или опровергнуть сделанные выводы.

Задачами прямых исследований посредством

ВИ в экологии являются наблюдения за состоянием экосистем и аспектами фенологических циклов. Помимо представленных широких задач, следует затронуть и более узкие, к которым относятся исследования процессов рекультивации и эффективности природоохранных мер [3].

За счет широкого охвата территории и возможности сверки наблюдений между годами и сезонами, карты, созданные на основе вегетационных индексов, позволяют с высокой точностью определить особенности состояния растительности. Данная особенность полезна при проведении исследований, связанных с оцениванием масштаба подтвержденных случаев антропогенного воздействия на окружающую среду, при этом виды антропогенного воздействия могут быть, как в виде прямого непосредственного ущерба растительности (незаконные вырубки, поджоги, аварии с выбросами вредных веществ в атмосферу), так и в виде косвенного ущерба (загрязнение грунтовых вод и атмосферы в ходе стандартной хозяйственной деятельности [4].

Обозначив основные задачи, следует обратить внимание на существующий инструментарий в области мониторинга посредством вегетационных индексов.

Критерии подбора вегетационных индексов для комплексных изысканий в экологии

Определив требуемую практическую задачу в области экологических изысканий следует перейти к подбору вегетационных индексов для ее решения. Отдельно следует добавить дополнительный фактор, необходимый для метода – доступность данных ВИ. Доступность данных затрагивает, как возможности космических аппаратов и их оборудования для подготовки снимков, так и наличие доступа к зарубежным базам данных. Вегетационные индексы, применяемые в рамках указанных задач должны быть доступны для расчетов и соответствовать условиям исследуемой территории.

Каждый отдельно взятый вегетационный индекс рассчитывается посредством параметров оборудования для дистанционной фотосъемки и зависит от пространственного разрешения и спектрального разрешения. Следует отметить, что наблюдения посредством наиболее старых ВИ ведутся более 30 лет, что позволяет использовать значительную базу данных для ретроспективного анализа в рамках экологических изысканий. Как правило вегетационные индексы с базами данных длительного наблюдения просты в расчетах и считываются большим количеством аппаратов, к ним относятся такие ВИ, как: NDVI, EVI, NDWI, SAVI, DVI, GNDVI [5,6,7,8].

Передовыми и более сложными вегетационными индексами следует считать: PRI, PVI, TSAVI, GEMI, вегетационные индексы аппарата MERIS и ряд других. Они отличаются значительно более сложной формулой, что в свою очередь ужесточает

требования к оборудованию на борту спутника, и особыми корректировками предварительной обработки снимка.

Практика современных экологических исследований показывает, что даже самый совершенный с точки зрения физической модели индекс редко способен дать исчерпывающую характеристику состояния экосистемы при изолированном применении. Каждый вегетационный индекс, независимо от сложности его расчета, по своей природе является редуцированным показателем, то есть сводит многомерную спектральную информацию к одному числовому значению. Это неизбежно влечет за собой потерю части данных и чувствительность к специфическим помехам.

В качестве примеров следует оценить преимущества и недостатки вегетационных индексов, имеющих широкое применение в исследованиях:

- NDVI демонстрирует высокую корреляцию с биомассой, но подвержен насыщению в сомкнутых лесах. Отдельно следует подчеркнуть значительные отклонения при расчетах в случае влажности почвы, наличия водных объектов и атмосферных помех.

- EVI успешно нивелирует атмосферные искажения и эффекты насыщения, однако менее чувствителен к небольшим изменениям в содержании влаги.

- NDWI полезен при оценке гидрологического стресса, но не позволяет делать выводы о продуктивности растительности.

- SIPI эффективен при оценке соотношения каротиноидов и хлорофилла, выступая маркером стресса и старения растительности. Его ключевое ограничение заключается в слабой чувствительности к изменению общей архитектуры полога и листовой поверхности, что делает его малоинформативным для оценки биомассы и структурных изменений фитоценоза.

- LCI точен эффективен в оценке хлорофилла с точностью до листа, но требует сложных расчетов и не имеет открытого доступа к базам данных.

- MSI эффективен для оценки содержания влаги в растительном покрове и выявления водного стресса, особенно в засушливых регионах. Однако он чувствителен к состоянию почвы и растительным остаткам, что может давать ложные сигналы на территориях с редким или неоднородным покровом/

- NDNI применяется для диагностики количества азота в экосистеме на основе спектральных характеристик в коротковолновой инфракрасной области. Данный индекс крайне чувствителен к водному стрессу и фоновому влиянию частей растений без хлорофилла, что требует обязательной калибровки по наземным данным и ограничивает его применение на гетерогенных природных территориях [9,10,11].

В связи с перечисленными примерами возника-

ет необходимость применять на практике не один, а несколько ВИ, в целях повышения точности и нивелирования ошибок, что уже осуществляется на практике в геологических и сельскохозяйственных исследованиях [12]. В области экологического мониторинга такой подход позволяет компенсировать ограничения отдельно взятых показателей и сформировать более объемное представление о происходящих процессах [13]. Следует отметить отсутствие единого механизма подбора вегетационных индексов в целях их комплексного применения. Как правило, дополнительные вегетационные индексы применяются, если в показателях, полученных предварительным анализом найдены помехи и неточности. На основе этого возможно сформировать базовые требования к вегетационным индексам, используемым вместе:

- Возможность корректировки одного ВИ данными другого ВИ;

- Наличие длительных наблюдений хотя бы по одному ВИ в целях оценивания закономерности экологических процессов в регионе наблюдения.

- Последовательное логическое решение основной задачи, если она комплексная и требует многофакторного подхода.

На основе вышеизложенного необходимо перейти к анализу возможных вариаций комплексов вегетационных индексов и их потенциальных возможностей в рамках экологического мониторинга.

Вариации комплексов вегетационных индексов и их прикладные возможности

Так как каждый вегетационный индекс имеет свои шкалы, расчетные диапазоны, особенности применения, совокупное использование нескольких различных ВИ с конкретной целью позволяют заложить фундамент для широких исследований в области экологической оценки.

Для систематизации исследований в области комплексного применения вегетационных индексов, следует ввести обозначения для каждого индекса в связке. Основным индексом будет считаться определяющий наличие или отсутствие какой-либо формы воздействия, дополнительным будет считаться определяющий уточняющие параметры, при уже подтвержденном воздействии на экологию.

При использовании нескольких вегетационных индексов следует основное внимание уделить решаемой задаче. Основным вегетационный индекс должен позволить подтвердить возможность применения дополнительных.

В таблице 1 приведены комплексы вегетационных индексов, применяемые в ходе решения задачи экологического мониторинга и получаемые качественные показатели.

Приведенные в таблице вегетационные индексы, указанные в комплексах первыми, имеют основную задачу в виде фиксации деградации

Таблица 1

Варианты комплексов вегетационных индексов и решаемые задачи при их использовании

Комплексы вегетационных индексов	Решаемые задачи	Получаемые качественные показатели
NDVI + EVI + NBR	Комплексный мониторинг нарушений в лесных экосистемах	Общее здоровье растительности. Превышение в экосистеме концентраций соединений серы, хлора.
GCI + MTCI + NDVI	Мониторинг состояния хлорофилла	Раннее выявление превышений тяжелых металлов, соединений фтора и хлора в экосистеме
NDVI + ARVI + MSI	Мониторинг зеленой растительности по параметрам засухи	Состояние экосистемы, с параметрами влажности, вне зависимости от погодных условий
NDVI + PRI + SIPI	Оценка фотосинтетического стресса	Общее здоровье растительности. Показатели превышения в экосистеме азотистых соединений и соединений серы
VCI + PRI	Оценка фотосинтетического стресса в привязке к ксантофилловым циклам	Показатели засухи или чрезмерного увлажнения растительности. Отклонение от фенологических циклов
NDVI + NDRE	Оценка фотосинтетического стресса и хлорофилла	Общее здоровье растительности. Оценка объема биомассы
GCI + PRI + SIPI	Оценка процессов деградации или рекультивации на изучаемой территории. Оценка фотосинтетического стресса	Общее здоровье растительности. Показатели превышения в экосистеме азотистых соединений и соединений серы
NDVI+SIPI+NDNI	Оценка фотосинтетического стресса. Оценка процессов сукцессии. Оценка антропогенного воздействия	Общее здоровье растительности. Показатели превышения в экосистеме азотистых соединений или тяжелых металлов

окружающей среды. Наиболее подходящими основными вегетационными индексами являются NDVI, GCI, VCI, NDWI (если исследование затрагивает территории с водными объектами). Последующие вегетационные индексы в комплексах имеют уже более специальное назначение в рамках задачи. Комплекс может состоять и из большего количества ВИ, чем те, что приводятся в таблице.

Каждый вегетационный индекс из указанных имеет свое специальное значение, что позволяет составлять большое количество комплексов ВИ для решения конкретных задач. Ограничения этого механизма связаны только с:

- Недостатком архивных данных;
- Отсутствием данных прошлых лет (позволяющих утверждать об изменениях в экологических показателях);
- Отсутствием требуемых параметров оборудования у спутников, осуществляющих мониторинг.

В качестве примера следует привести сравнение снимка поля посредством NDVI и NDRE на рисунке 1. Заметно отличается внешний вид обработанной площади в связи с тем, что вегетационный индекс NDVI в рамках сельскохозяйственного исследования показывает густоту растительности и позволяет оценить ее здоровье, при этом индекс NDRE наиболее эффективен при проведении анализа растительности в поздние стадии созревания. Таким образом исследователи воспользовались комплексным подходом и извлекли преимущества обоих ВИ в рамках своей задачи [14].

Основной эффект от совокупного применения вегетационных индексов проявляется в экономии

времени и денежных средств, при этом мониторинг может осуществляться и на удаленных территориях. Методы мониторинга с использованием комплекса ВИ наиболее эффективны в том числе с выполнением исследований больших территорий, недоступных к быстрому изучению стандартными методами. Особенно следует подчеркнуть возможность решения структурно сложных задач мониторинга, в том числе с задействованием иных методов и показателей, позволяющих валидировать и уточнять получаемые показатели.

Заключение

В результате проведенного исследования обоснована целесообразность применения комплексов вегетационных индексов для задач экологического мониторинга. Показано, что изолированное использование одного вегетационного индекса, способно привести к потере информации и снижению достоверности выводов из-за присущих каждому индексу ограничений, сформированных в математическом аппарате каждого ВИ. Отмечается уже существующее комплексное применение ВИ в других отраслях науки, где демонстрируется высокая эффективность метода.

На основе анализа специфики применения ВИ сформулированы две группы экологических задач, решаемых с помощью комплексов ВИ:

- валидационные для подтверждения или опровержения данных иных методов;
- прямые исследования, как оценка состояния экосистем, фенологических циклов, процессов рекультивации и последствий антропогенного воздействия.



Рис. 1. Обработанные снимки ВИ NDVI и NDRE

Особое внимание уделяется сложности подбора ВИ под конкретные задачи и предложены подходы к формированию комплексов, учитывающие критерии доступности данных, длительности ретроспективных наблюдений, взаимную компенсацию недостатков индексов и последовательное решение многофакторных задач. Введено функциональное разделение на базовый и дополнительные индексы.

Практическая значимость работы заключается в обосновании экономии ресурсов, повышения точности мониторинга посредством спутникового

зондирования, валидации уже имеющихся знаний об окружающей среде, а также в возможности ретроспективного анализа экологических нарушений по спутниковым архивам.

Отмечается высокая перспективность метода комплексного использования вегетационных индексов в связи с увеличением количества спутниковых аппаратов с задачами дистанционного зондирования и нарастающей важностью природоохранных мероприятий в экологическом развитии России.

Список литературы

1. Рассадина Е.В. Биоиндикация и ее место в системе мониторинга окружающей среды // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2007. №2(5). С. 48-53.
2. Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование Земли. Учеб. пособие. Иркутск. Изд-во ИГУ. 2013. С. 124-139.
3. Саченок Д.А. Анализ возможностей спутниковых систем в области экологического мониторинга особо охраняемых природных территорий.
4. Саченок Д.А., Саченок А.И., Цирин И.В. // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2025. №3(173). С. 23-35. DOI 10.71536/vd.2025.3c173.3. EDN ZVZWZX.
5. Маневич П.П. Анализ пространственных данных и применение риск-ориентированного подхода с использованием методов дистанционного зондирования для мониторинга вегетационного состояния на угледобывающих территориях / П.П. Маневич // Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 11-15 ноября 2024 года. Москва: Институт космических исследований Российской академии наук. 2024. С. 191. EDN ZAONIY.
6. Bayarsaikhan U. et al. Early validation study of the photochemical reflectance index (PRI) and the normalized difference vegetation index (NDVI) derived from the GCOM-C satellite in Mongolian grasslands. International Journal of Remote Sensing. 2022. V. 43. No. 14. Pp. 5145-5172.
7. Gobron N. et al. The MERIS Global Vegetation Index (MGVI): description and preliminary application. International Journal of Remote Sensing. 1999. V. 20. No. 9. Pp. 1917-1927.
8. Zambrano F. et al. Sixteen years of agricultural drought assessment of the BioBio region in Chile using a 250 m resolution Vegetation Condition Index (VCI). Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 6. Pp. 530.
9. Костеша В.А. Формирование региональных планов вовлечения сельскохозяйственных земель в оборот по данным дистанционного зондирования Земли / В.А. Костеша, Л.Г. Евстратова, А.О. Андрейченко, Е.А. Щукина // Мониторинг. Наука и технологии. 2025. №4(66). С. 6-14. DOI 10.25714/MNT.2025.66.001. EDN RDYXAU.
10. Sims D.A. et al. On the use of MODIS EVI to assess gross primary productivity of North American ecosystems. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2006. V. 111. No. G4.
11. Krishnan V. Development of a multidimensional living conditions index (LCI). Social Indicators Research. 2015. V. 120. No. 2. Pp. 455-481.
12. Huete A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote sensing of environment. 1988. V. 25. No. 3. Pp. 295-309.
13. Даукаев Р.А., Сулейманов Р.А. Эколого-гигиеническая оценка влияния предприятий черной металлургии на окружающую среду территорий Башкирского Зауралья // Экология человека. 2008. №7. С. 9-13.
14. EOS Data Analytics. Individual Stand Monitoring. EOSDA Forest Monitoring Guide. 2023. URL: <https://eos.com/user-guide/forest-monitoring/individual-stands/>.

References

1. Rassadina E.V. Bioindication and its place in the environmental monitoring system. Vestnik Ul'yanovskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii. 2007. No. 2(5). Pp. 48-53.
2. Sutyryna E.N. Distantionnoye zondirovaniye Zemli [Remote sensing of the Earth]. Tutorial. Irkutsk, Publishing House of ISU. 2013. Pp. 124-139.

3. Sachenok D.A. Analysis of the capabilities of satellite systems in the field of environmental monitoring of specially protected natural areas.
4. Sachenok D.A., Sachenok A.I., Tsirin I.V. *Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury*. 2025. No. 3(173). Pp. 23-35. DOI 10.71536/vd.2025.3c173.3. EDN ZVZWZX.
5. Manevich P.P. *Analiz prostranstvennykh dannykh i primeneniye risk-oriyentirovannogo podkhoda s ispol'zovaniyem metodov distantsionnogo zondirovaniya dlya monitoringa vegetatsionnogo sostoyaniya na ugledobyvayushchikh territoriyakh* [Analysis of spatial data and the application of a risk-based approach using remote sensing methods to monitor the growing conditions in coal mining territories]. Materials of the 22nd International Conference «Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space». Moscow. November 11-15, 2024. Moscow: Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences. 2024. Pp. 191. EDN ZAONIY.
6. Bayarsaikhan U. et al. Early validation study of the photochemical reflectance index (PRI) and the normalized difference vegetation index (NDVI) derived from the GCOM-C satellite in Mongolian grasslands. *International Journal of Remote Sensing*. 2022. V. 43. No. 14. Pp. 5145-5172.
7. Gobron N. et al. The MERIS Global Vegetation Index (MGVI): description and preliminary application. *International Journal of Remote Sensing*. 1999. V. 20. No. 9. Pp. 1917-1927.
8. Zambrano F. et al. Sixteen years of agricultural drought assessment of the BioBio region in Chile using a 250 m resolution Vegetation Condition Index (VCI). *Remote Sensing*. 2016. V. 8. No. 6. Pp. 530.
9. V.A. Koshesha, L.G. Evstratov, A.O. Andreichenko, E.A. Shchukin. Formation of regional plans for the involvement of agricultural land in circulation according to data from remote sensing of the Earth. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2025. No. 4(66). Pp. 6-14. DOI 10.25714/MNT.2025.66.001. EDN RDYXAU.
10. Sims D.A. et al. On the use of MODIS EVI to assess gross primary productivity of North American ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2006. V. 111. No. G4.
11. Krishnan V. Development of a multidimensional living conditions index (LCI). *Social Indicators Research*. 2015. V. 120. No. 2. Pp. 455-481.
12. Huete A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*. 1988. V. 25. No. 3. Pp. 295-309.
13. Daukaev R.A., Suleymanov R.A. Ecological and hygienic assessment of the impact of ferrous metallurgy enterprises on the environment of the territories of the Bashkir Trans-Urals. *Ekologiya cheloveka*. 2008. No. 7. Pp. 9-13.
14. EOS Data Analytics. Individual Stand Monitoring. EOSDA Forest Monitoring Guide. 2023. URL: <https://eos.com/user-guide/forest-monitoring/individual-stands/>.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Саченок Даниил Алексеевич

аспирант кафедры безопасности и экологии горного производства Национального исследовательского технологического университета МИСИС, 119049, Москва, Россия; специалист центра исследований охраны труда ФГБУ «ВНИИ труда» Минтруда России, 105043, Москва, Россия

Туманян Камилла

аспирант кафедры безопасности и экологии горного производства Национального исследовательского технологического университета МИСИС, 119049, Москва, Россия

Information about authors
Affiliations

Sachenok Daniil Alekseevich

Postgraduate Student, Department of Safety and Ecology of Mining at the National Research Technological University «MISIS», 119049, Moscow, Russia; Specialist of the Labor Protection Research Department of the FSI ASRI for Occupational Safety and Labor Economics, 105043 Moscow, Russia

Tumanyan Camilla

Postgraduate Student, Department of Safety and Ecology of Mining at the National Research Technological University «MISIS», 119049, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 17.04.2026 г.

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА Г. СУРГУТА: ИНТЕГРАЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ SENTINEL-5P И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Алексеев К.С., Ильченко А.А.

*ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный
исследовательский университет) имени И.М. Губкина», 119991, Москва, Россия
[e-mail: ilchenko.a@gubkin.ru](mailto:ilchenko.a@gubkin.ru)*

Работа посвящена оценке качества атмосферного воздуха в г. Сургуте – крупнейшем центре нефтегазовой промышленности Западной Сибири. Исходными данными служат измерения тропосферного содержания диоксида азота (NO_2), полученные спектрометром TROPOMI (спутник Sentinel-5P), и метеорологические параметры модели ERA5 за период 2019-2024 гг. Для решения проблемы неполноты спутниковых рядов, вызванной высокой облачностью и сезонным недостатком освещенности в высоких широтах, применена методика восстановления концентраций с использованием алгоритмов машинного обучения (Random Forest). В модель внедрены физически обоснованные предикторы: «индекс застоя» (Stagnation Index) и показатель отопительной нагрузки, позволяющие учитывать влияние метеорологического потенциала атмосферы и сезонной эмиссии от объектов теплоэнергетики. Результаты моделирования ($R^2 \approx 0.40$) показали, что пиковые концентрации NO_2 в Сургуте формируются преимущественно в холодный период при сочетании интенсивной работы ТЭЦ и неблагоприятных метеоусловий («эффект зимней ловушки»). Вклад лесных пожаров (через аэрозольный индекс) оценен как второстепенный по сравнению с локальными техногенными источниками. Предложенный подход позволяет проводить непрерывную оценку загрязнения в период с февраля по ноябрь, существенно дополняя данные наземных наблюдений.

Ключевые слова: геоэкологический мониторинг, загрязнение атмосферы, Сургут, машинное обучение, Random Forest, Sentinel-5P, TROPOMI, диоксид азота, ERA5.

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF ATMOSPHERIC AIR QUALITY IN SURGUT: INTEGRATION OF SENTINEL-5P SATELLITE DATA AND METEOROLOGICAL PARAMETERS

Alekseev K.S., Il'chenko A.A.

National University of Oil and Gas «Gubkin University», 119991, Moscow, Russia

This study assesses atmospheric air quality in Surgut, the largest oil and gas industrial center in Western Siberia. The initial data consist of tropospheric nitrogen dioxide (NO_2) measurements from the TROPOMI spectrometer (Sentinel-5P satellite) and meteorological parameters from the ERA5 reanalysis model for the period 2019-2024. To address the issue of fragmented satellite data due to high cloud cover and seasonal lack of illumination at high latitudes, a concentration reconstruction methodology based on machine learning algorithms (Random Forest) was applied. Physically meaningful predictors were integrated into the model: a «Stagnation Index» and a heating demand indicator, which account for the influence of atmospheric meteorological potential and seasonal emissions from thermal power facilities. The modeling results ($R^2 \approx 0.40$) demonstrate that peak NO_2 concentrations in Surgut primarily occur during the cold season, driven by the combined effect of intense thermal power plant operation and unfavorable meteorological conditions (the «winter trap» effect). The contribution of wildfires, assessed via the aerosol index, was found to be secondary compared to local anthropogenic sources. The proposed approach enables continuous pollution assessment from February to November, significantly supplementing ground-based observation data. **Keywords:** cryogenic processes, decryption features, automated classification, remote monitoring, and detection of cryogenic processes.

Keywords: geoeological monitoring, air pollution, Surgut, machine learning, Random Forest, Sentinel-5P, TROPOMI, nitrogen dioxide, ERA5.

Введение

Качество атмосферного воздуха в нефтегазодобывающих регионах Западной Сибири определяет экологическую безопасность населения [1]. Сургут испытывает антропогенную нагрузку от ГРЭС-1, ГРЭС-2 и транспорта, усугубляемую климатическими условиями застоя. Наземный мониторинг ограничен стационарными постами. ДЗЗ обеспечивает региональный охват зон загрязнения [2]. В настоящее время наиболее информативным инструментом для оценки концентраций газов, включая диоксид азота (NO_2), является спектрометр TROPOMI (спут-

ник Sentinel-5P). Успешный опыт использования этого прибора для анализа воздуха в промышленных центрах России описан в ряде недавних исследований [3,4]. В частности, в работах [5] была проведена детальная оценка качества воздуха в городах Севера и выявлены основные сезонные закономерности.

Зарубежные исследования отмечают ограничения спутниковых данных в высоких широтах: высокая облачность и полярная ночь вызывают до 50% пропусков в данных по городам Западной Сибири, особенно в периоды накопления загрязнений [6]. Для восстановления предлагается интеграция

спутниковых снимков TROPOMI с метеоданными ERA5 и машинным обучением. [7]. Цель работы – разработать методику оценки качества воздуха в Сургуте, объединив спутниковые данные и метеорологические параметры. Это позволит восстановить пропущенные из-за облачности значения и обеспечить непрерывный мониторинг в период с февраля по ноябрь.

Материалы и методы

Мониторинг загрязнения воздуха на высоких широтах крайне актуален, но сталкивается с ограничениями: частая облачность, низкий угол солнца и шум от снежного покрова, искажающий оптические измерения. Для апробации метода выбран г. Сургут – типичный нефтегазовый центр с суровым климатом и высокой антропогенной нагрузкой от ТЭЦ, промышленности и транспорта.

Обработка данных проводилась в Google Earth Engine (GEE), что позволило агрегировать спутниковые снимки, отфильтровать их и подготовить временные ряды для модели [8]. Информационную базу составили спутниковые данные продукта уровня обработки Level-3 (L3) спектрометра TROPOMI на борту спутника Sentinel-5P [9,10], содержащие сведения о плотности диоксида азота в тропосфере, а также аэрозольный индекс (AAI). Метеорологические данные получены из глобального реанализа ERA5 (ECMWF) и включали параметры приземного слоя атмосферы: температуру воздуха, атмосферное давление, а также векторные составляющие ветра [11].

В работе использовался продукт уровня L3 из коллекции COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO₂, так как он удобен для анализа изменений NO₂ за длительный период с 2019 по 2024 год. [12] Данный продукт содержит усредненные суточные данные по всей территории Земли на регулярной сетке, поэтому с ним проще работать и сравнивать значения за разные даты. Для данных L3 TROPOMI недо-

ступен стандартный показатель качества qa_value (есть только в L2), поэтому создан комбинированный фильтр: облачность <50% и солнечный зенитный угол <80°. Среднесуточная концентрация NO₂ рассчитывалась как среднее по всем валидным пикселям в границах города [13,14]. Метеорологические параметры преобразованы в индексы: HDD (градусо-сутки отопления), Stagnation Index (P/скорость ветра) и Winter Stagnation (HDD×Stagnation) с лагами за сутки. Для восстановления полей NO₂ применён Random Forest – устойчивый к шуму алгоритм с оценкой важности факторов загрязнения [15]. Валидация проводилась по схеме временного разделения: обучение на данных 2019-2023 гг., тестирование на независимой выборке 2024 года.

Результаты и обсуждения

Первый этап анализа подтвердил нехватку спутниковых данных по NO₂ в Сургуте – около 50% измерений недоступны, особенно осенью (валидность всего 42%). Для решения проблемы создали модель машинного обучения на данных 2019-2023 гг. (677 дней). Она прогнозирует NO₂ даже без спутников. Тестировали на данных 2024 г.: базовая модель дала R²=0.28, улучшенная (с метео-индексами и лагами) – R²=0.38 при ошибке 11.5 мкмоль/м². График (рис. 1) показывает, что модель точно ловит сезонные пики и тренды.

Одним из ключевых результатов работы стало ранжирование факторов, влияющих на качество воздуха в Сургуте. Анализ важности признаков (Feature Importance) подтвердил высокую физическую интерпретируемость предложенной модели (таблица 1).

Наиболее значимым фактором стал разработанный Winter Stagnation Index (13.3%), подтвердивший основную гипотезу исследования: максимальные концентрации NO₂ в Сургуте формируются при синергии экстремально низких температур и условий атмосферного застоя. Второе место

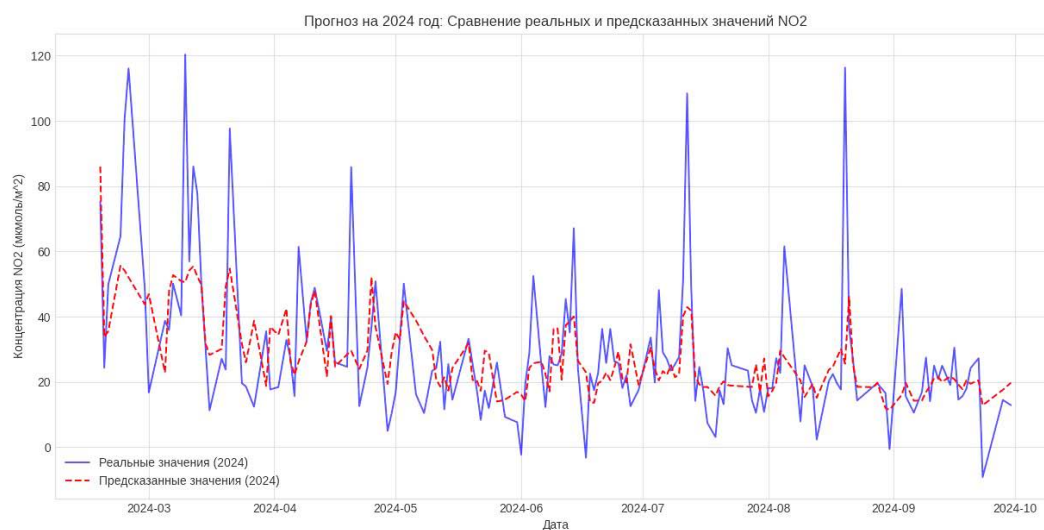


Рис. 1. Линейный график: Временной ряд NO₂ (2024)

Таблица 1

Важность признаков для модели

№	признак	важность
1	winter_stagnation	0.133099
2	pressure_hpa	0.104385
3	stagnation_index	0.084120
4	wind_direction	0.063655
5	no2_lag_1	0.062631
6	no2_roll_mean_7	0.058233
7	no2_roll_mean_3	0.055760
8	temperature_lag_1	0.053903
9	wind)speed	0.051855
10	aai_lag_1	0.050425

по важности заняло атмосферное давление (10.4%), третье – Stagnation Index (8.4%). Их совокупный эффект указывает на роль антициклонов, блокирующих вертикальное рассеивание загрязнителей. Направление ветра (6.3%) оказалось важнее скорости ветра (5.1%), что объясняется геометрией переноса выбросов от промышленных источников ГРЭС-1 и ГРЭС-2 к жилым зонам города. Группа признаков, описывающих предысторию загрязнения (лаг за 1 день no2_lag_1 и скользящие средние за 3-7 дней), суммарно вносит существенный вклад в прогноз, что подтверждает накопительный характер загрязнения в периоды неблагоприятных метеорологических условий. Аэрозольный индекс ААИ и его лаговые значения заняли промежуточные позиции по значимости, обеспечив вклад около 4-5%. Это указывает на то, что трансграничный перенос продуктов горения при лесных пожарах оказывает заметное, но не определяющее влияние по сравнению с локальной техногенной нагрузкой и метеорологическими условиями холодного периода.

Анализ восстановленных рядов NO₂ за 2024 г. выявил сезонную цикличность загрязнения Сургута с максимумами в холодный период (ноябрь-март), обусловленными отопительной нагрузкой (HDD), и летними минимумами (июнь-август) за счет турбулентного рассеивания. Экстремальные пики (рисунок 1) формируются при синергии Winter Stagnation и антициклонов. Летние всплески связаны с трансграничным переносом дыма лесных пожаров (ААИ), но их амплитуда существенно ниже зимних техногенных максимумов.

Верификация результатов модели

Для подтверждения физической интерпретируемости модели была проведена точечная верификация прогнозов на контрастных метеорологических ситуациях. Анализ проводился для двух сезонов: зимнего и летнего. Представлены результаты моделирования для двух дат апреля 2024 года с принципиально разными метеорологическими условиями (таблица 2).

При морозе (-13.45°C), слабом ветре и давлении 1020 гПа индекс Winter Stagnation достиг ~14000. Модель точно спрогнозировала NO₂ (47.83 мкмоль/м³, MAE=1.00). После потепления (+0.9°C) и усиления ветра (4.9 м/с) индекс снизился в 4 раза, прогноз 24.68 мкмоль/м³ также подтвердился. В отопительный сезон модель эффективно описывает синергию эмиссий ТЭЦ и застоя.

В летний период (таблица 3) зависимость от отопления исчезает, и качество прогноза зависит от иных факторов.

Модель точно спрогнозировала фоновое состояние 30 августа при сильном ветре и умеренной температуре, обеспечивающих эффективное рассеивание примесей.

Экстремальное расхождение наблюдалось 20 августа при почти полном штиле на фоне теплой погоды: низкий Winter Stagnation Index привел к недооценке накопления техногенных эмиссий в условиях высокого Stagnation Index.

Разработанный подход эффективен для прогнозирования системного зимнего загрязнения от теплоэнергетики и чувствителен к синоптическим

Таблица 2

Верификация модели в зимний период

Сезон	Зимний	
Дата	11.04.2024	16.04.2024
Температура	-13.45°C	0.9°C
Скорость ветра	2.37 м/с	4.9 м/с
Давление	1020 гПа	1012 гПа
Winter Stagnation	13971.58	3478.58
Stagnation Index	439.41	182.45
Реальный NO ₂	48.83 мкмоль/м ³	26.00 мкмоль/м ³
Прогноз модели	47.83 мкмоль/м ³	24.68 мкмоль/м ³
Ошибка (MAE)	1.00	1.32

Верификация модели в летний период

Сезон	Летний	
Дата	20.08.2024	30.08.2024
Температура	15.8°C	11.2°C
Скорость ветра	1.25 м/с	4.75 м/с
Давление	1000 гПа	1006 гПа
Winter Stagnation	1870.96	1684.30
Stagnation Index	930.58	261.36
Реальный NO ₂	116.34 мкмоль/м ³	16.55 мкмоль/м ³
Прогноз модели	25.54 мкмоль/м ³	11.89 мкмоль/м ³
Ошибка (MAE)	90.80	4.67

изменениям, однако требует дополнения предикторами промышленной активности для учета летних аномалий

Выводы

В ходе исследования разработана методика геоэкологической оценки качества воздуха в Сургуте на основе интеграции спутниковых данных TROPOMI/Sentinel-5P, метеопараметров ERA5 и алгоритмов машинного обучения. Установлена метеозависимость NO₂: зимние пики обусловлены «ловушкой» от ТЭЦ-выбросов в условиях застоя и антициклонов; летние эпизоды – трансграничным переносом дыма пожаров (AAI, меньший вклад).

Методика обеспечивает непрерывный мониторинг (февраль-ноябрь), дополняя наземные станции, с ограничениями по полярной ночи, снежному шуму и разрешению моделей.

Основной результат – разработанная прогностическая модель Random Forest ($R^2 \approx 0.40$) для восстановления пропусков спутниковых данных NO₂ с предикторами: индекс застоя и HDD. Модель интерпретируема и воспроизводит сезонную динамику. Перспективы дальнейшего развития – применение градиентного бустинга, учет локальных промышленных факторов и адаптация для других арктических промышленных центров.

Список литературы

1. Мартынович А.А. Теория и методы обеспечения экологической безопасности технологических объектов и территорий в целях устойчивого природопользования на примере Западной Сибири: автореферат дис. ... доктора технических наук: 25.00.36 / Моск. гос. ун-т геодезии и картографии. Москва. 2003. 40 с.
2. Бондур В.Г. Космический мониторинг антропогенных воздействий на воздушную среду // Исследование Земли из космоса. 2021. №1. С. 3-21. DOI: 10.31857/S0205961421010036.
3. Морозова А.Э., Сизов О.С., Миронова М.А. Дистанционная оценка качества атмосферного воздуха в пределах крупнейших месторождений нефти и газа России (2019-2023) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. №1. С. 285-300. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-285-300.
4. Морозова А.Э., Сизов О.С., Миронова М.А., Лобжанидзе Н.Е. Дистанционная оценка качества атмосферного воздуха в населенных пунктах нефтегазовой специализации Ямало-Ненецкого автономного округа // Геодезия и картография. 2023. №11. С. 31-42. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1001-11-31-42.
5. Морозова А.Э., Сизов О.С., Елагин П.О., Агзамов Н.А. Интегральная оценка качества атмосферного воздуха в крупнейших городах России на основе данных TROPOMI (Sentinel-5P) за 2019-2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. №4. С. 23-39. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-23-39.
6. Kaplan G., Avdan Z.Y. Space-borne air pollution observation from Sentinel-5P TROPOMI: Relationship between pollutants, geographical and demographic data. International Journal of Engineering and Geosciences. 2020. Vol. 5. No. 3. Pp. 130-137. DOI: 10.26833/ijeg.644089.
7. Дубнов Ю.А., Полищук В.Ю., Попков Ю.С. [и др.] Метод энтропийно-рандомизированного восстановления пропущенных данных // Автоматика и телемеханика. 2021. №4. С. 140-160. DOI 10.31857/S0005231021040061. EDN KDPJBJ.
8. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 202. Pp. 18-27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
9. Veefkind J.P., Aben I., McMullan K. et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 120. Pp. 70-83. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.027.
10. Гусев А.П., Флерко Т.Г. Дистанционный индикатор риска загрязнения атмосферы, TROPOMI Air Quality Index, при мониторинге трансграничных воздействий // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2025. Т. 11 (77). №2. С. 120-129.
11. Константинова А.М., Бриль А.А., Лупян Е.А. Оценки выбросов диоксида азота по данным прибора TROPOMI и с учетом метеословесий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. №6. С. 153-167. DOI 10.21046/2070-7401-2025-22-6-153-167.
12. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146. No. 730. Pp. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
13. NASA. Algorithm Overview [Электронный ресурс]. URL: <https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/products/daily/algorithm-overview> (дата обращения: 14.04.2026).
14. Chan K.L., Khorsandi E., Liu S., Baier F., Valks P. Estimation of surface NO₂ concentrations over Germany from TROPOMI satellite observations using a machine learning method. Remote Sensing. 2021. Vol. 13. No. 5. Art. 969. DOI 10.3390/rs13050969.
15. Коптев С.В., Алабдуллахалхасно Х. Применение алгоритма Random Forest для анализа динамики таежно-тундровых лесных экосистем // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2025. №2. С. 210-218.

References

1. Martynovich A.A. *Teoriya i metody obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti tekhnologicheskikh ob'yektov i territoriy v tselyakh ustoychivogo prirodopol'zovaniya na primere Zapadnoy Sibiri* [Theory and methods for ensuring environmental safety of technological facilities and territories for the purposes of sustainable nature management using the example of Western Siberia]. Abstract of the dissertation... Doctor of Technical Sciences: 25.00.36. Moscow State University of Geodesy and Cartography. Moscow. 2003. 40 p.
2. Bondur V.G. Space monitoring of anthropogenic impacts on the air environment. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2021. No. 1. Pp. 3-21. DOI: 10.31857/S0205961421010036.
3. Morozova A.E., Sizov O.S., Mironova M.A. Remote assessment of atmospheric air quality within the largest oil and gas fields in Russia (2019-2023). *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2025. V. 22. No. 1. Pp. 285-300. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-285-300.
4. Morozova A.E., Sizov O.S., Mironova M.A., Lobzhanidze N.E. Remote assessment of atmospheric air quality in populated areas of the oil and gas specialization of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. *Geodeziya i kartografiya*. 2023. No. 11. Pp. 31-42. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-1001-11-31-42.
5. Morozova A.E., Sizov O.S., Elagin P.O., Agzamov N.A. Integral assessment of atmospheric air quality in the largest cities of Russia based on TROPOMI (Sentinel-5P) data for 2019-2020. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022. V. 19. No. 4. Pp. 23-39. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-23-39.
6. Kaplan G., Avdan Z.Y. Space-borne air pollution observation from Sentinel-5P TROPOMI: Relationship between pollutants, geographical and demographic data. *International Journal of Engineering and Geosciences*. 2020. Vol. 5. No. 3. Pp. 130-137. DOI: 10.26833/ijeg.644089.
7. Dubnov Yu.A., Polischuk V.Yu., Popkov Yu.S. [et al.] Method of entropy-randomized recovery of missing data. *Avtomatika i telemekhanika*. 2021. No. 4. Pp. 140-160. DOI 10.31857/S0005231021040061. EDN KDPJBJ.
8. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. Vol. 202. Pp. 18-27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
9. Veefkind J.P., Aben I., McMullan K. et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. Pp. 70-83. DOI: 10.1016/j.rse.2011.09.027.
10. Gusev A.P., Flerko T.G. Remote indicator of air pollution risk, TROPOMI Air Quality Index, in monitoring transboundary impacts. *Uchenyye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2025. V. 11(77). No. 2. Pp. 120-129.
11. Konstantinova A.M., Bril' A.A., Lupyan E.A. Estimates of nitrogen dioxide emissions based on TROPOMI instrument data and taking into account meteorological conditions. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2025. V. 22. No. 6. Pp. 153-167. DOI 10.21046/2070-7401-2025-22-6-153-167.
12. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2020. Vol. 146. No. 730. Pp. 1999-2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
13. NASA. Algorithm Overview [Электронный ресурс]. URL: <https://atmosphere-imager.gsfc.nasa.gov/products/daily/algorithm-overview> (дата обращения: 14.04.2026).
14. Chan K.L., Khorsandi E., Liu S., Baier F., Valks P. Estimation of surface NO₂ concentrations over Germany from TROPOMI satellite observations using a machine learning method. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. No. 5. Art. 969. DOI 10.3390/rs13050969.
15. Koptev S.V., Alabdullahalkhasno H. Application of the Random Forest algorithm to analyze the dynamics of taiga-tundra forest ecosystems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*. 2025. No. 2. Pp. 210-218.

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Алексеев Кирилл Сергеевич

студент 4 курса кафедры геоэкологии РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 119991, Москва, Россия

Ильченко Анжела Асхатовна

старший преподаватель кафедры геоэкологии РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 119991, Москва, Россия

Information about authors Affiliations

Alekseev Kirill Sergeevich

4th year student of the Department of Geoecology National University of Oil and Gas «Gubkin University», 119991, Moscow, Russia

Il'chenko Anzhela Ashatovna

Senior Lecturer of the Department of Geoecology National University of Oil and Gas «Gubkin University», 119991, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 15.04.2026 г.

ОТ МОНИТОРИНГА БЕРЕГОВОЙ ЛИНИИ К ЗАДАЧАМ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИБРЕЖНОГО КАДАСТРА: ОПЫТ РЯДА СТРАН И НЕОБХОДИМОСТЬ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ ВЬЕТНАМА

Данг Тхань Нам, Ознамец В.В.

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»,

105064, Москва, Россия

e-mail: thanhnam27091995@gmail.com

В статье рассматривается переход от мониторинга береговой линии как задачи наблюдения за ее изменчивостью к задачам геодезического обеспечения прибрежного кадастра и управления прибрежной зоной. Исследование основано на анализе международных и вьетнамских публикаций, сравнительно-сопоставительном методе, систематическом подходе и научном обобщении. На примере Российской Федерации, США и Новой Зеландии показано, что управленческая ценность данных о береговой линии определяется не только точностью их получения, но и их стандартизацией, институционализацией и включением в систему управления. Установлено, что во Вьетнаме технологии мониторинга береговой линии развиваются быстро, однако переход от наблюдательных данных к их использованию для нужд прибрежного кадастра пока не сформирован как целостная интегрированная система. Обосновано, что основной пробел связан не с инструментами мониторинга как таковыми, а с отсутствием рамки стандартизации и интеграции данных о береговой линии в систему управления прибрежными земельными ресурсами. Показано также, что проблема заключается не только в недостаточной интеграции данных, но и в отсутствии комплексного геодезического подхода, позволяющего обеспечить требуемую точность, сопоставимость и прикладную пригодность данных о береговой линии для кадастровых целей.

Ключевые слова: береговая линия, геодезический мониторинг, комплексный геодезический подход, геодезическое обеспечение, прибрежный кадастр, морской кадастр, водная граница, геодезические технологии.

FROM SHORELINE MONITORING TO THE TASKS OF GEODETIC SUPPORT FOR COASTAL CADASTRE: THE EXPERIENCE OF SEVERAL COUNTRIES AND ITS RELEVANCE FOR VIETNAM

Dang Thanh Nam, Oznamets V.V.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

The article examines the transition from shoreline monitoring as a task of observing shoreline variability to the tasks of geodetic support for coastal cadastre and coastal zone management. The study is based on the analysis of international and Vietnamese publications, comparative analysis, a systematic approach, and scientific generalization. Using the experience of the Russian Federation, the United States, and New Zealand, the paper shows that the administrative value of shoreline data is determined not only by the accuracy of data acquisition, but also by their standardization, institutionalization, and integration into management systems. It is established that shoreline monitoring technologies in Vietnam are developing rapidly; however, the transition from observational data to their use for coastal cadastre has not yet formed an integrated system. It is substantiated that the main gap lies not only in the lack of a framework for standardization and integration of shoreline data into coastal land management, but also in the absence of an integrated geodetic approach capable of ensuring the required accuracy and applicability of shoreline data for cadastral purposes.

Keywords: shoreline, geodetic monitoring, integrated geodetic approach, geodetic support, coastal cadastre, marine cadastre, water boundary, geodetic technologies.

Введение

Береговая линия – высокодинамичный природный объект. Она постоянно изменяется под совокупным воздействием волновых процессов, приливов и отливов, прибрежных течений, штормов, затоплений прибрежных территорий, а также социально-экономической деятельности человека [1].

Береговая линия является динамической границей, требующей не только съемки, но и стандартизации с учетом целей управления [2]. В современной кадастровой теории пространственные данные рассматриваются во взаимосвязи с правами и управлением, что придает береговой линии особое

значение для прибрежных территорий [3]. Развитие технологий активизировало мониторинг береговой линии, однако его ценность определяется не только сбором данных, но и возможностью их использования в управлении [4].

Для территории Вьетнама, характеризующейся протяженной береговой линией, воздействием штормов, штормовых нагонов, абразии, аккумуляции наносов, изменчивостью речных устьев и высоким хозяйственным освоением прибрежной зоны, проблема береговой линии имеет не только природно-географическое, но и геодезическое и управленческое значение. При этом вопрос состоит уже не

только в том, как точнее фиксировать положение береговой линии, но и в том, как обеспечить получение таких пространственных данных, которые были бы пригодны для задач кадастрового описания и управления прибрежными территориями. Существующие методы мониторинга береговой линии, применяемые в различных исследованиях, не всегда дают желаемый результат с точки зрения точности определения границ, оценки их перемещения, эффективности наблюдения за состоянием территории и формирования полной картины, необходимой для кадастровых целей. В связи с этим необходим переход к комплексному геодезическому подходу, основанному на использовании геодезических технологий, дистанционного зондирования, БПЛА и других средств наблюдения в рамках единой логики геодезического обеспечения [5].

Статья направлена на анализ опыта ряда стран в использовании геодезических технологий мониторинга береговой линии с позиций геодезического обеспечения прибрежного кадастра и на сопоставление этого опыта с вьетнамским контекстом. Научная новизна заключается в переосмыслении данных о береговой линии как основы кадастровой системы и в обосновании того, что основной пробел Вьетнама связан прежде всего со стандартизацией и интеграцией данных.

Методы исследования

Сравнительно-сопоставительный метод применён для анализа опыта Новой Зеландии, США и Российской Федерации по критериям определения береговой линии (водной границы), стандартов данных, степени интеграции в систему управления и возможностей применения для Вьетнама. Выбор этих стран обусловлен тем, что они представляют три характерных подхода: интеграцию в государственное пространственное управление, интеграцию в морской кадастр и институционализацию водных границ в кадастровой съёмке.

Кроме того, системный подход и метод научно-го обобщения использованы для построения логической рамки перехода от мониторинга береговой линии к её использованию для нужд прибрежного кадастра. В логике пространственного мониторинга пространственный объект следует рассматривать как процесс, способный изменяться во времени, а не только как результат единичного измерения. На этой основе в статье выявлены существующие пробелы во Вьетнаме и предложены направления совершенствования геодезических технологий мониторинга береговой линии в интересах управления прибрежными земельными ресурсами.

Статья вносит три основных научных вклада:

(1) уточнены теоретические основы перехода от мониторинга береговой линии к задачам геодезического обеспечения прибрежного кадастра;

(2) показано, что основным пробел Вьетнама

сегодня связан в первую очередь со стандартизацией и интеграцией управления данными о береговой линии, а не с инструментами геодезического мониторинга;

(3) предложена логическая рамка «геодезические технологии – управление» как основа для дальнейших исследований по совершенствованию геодезических технологий в интересах прибрежного кадастра.

Теоретические основы и опыт некоторых стран

С научной точки зрения береговая линия не может рассматриваться как единая неизменная граница. На практике съёмки и управления береговую линию можно понимать как мгновенный урез воды, приливную линию, средневысокую/средненизкую линию, границу водного объекта или границу, имеющую юридическое значение в управлении землей и морским пространством. Это означает, что само понятие «береговая линия» зависит от целей использования [6]. Поэтому ключевая задача береговой геодезии состоит не только в геометрическом определении положения линии, но и в правильном выборе типа береговой линии в каждом конкретном техническом, правовом и управленческом контексте.

С кадастровой точки зрения береговая линия приобретает управленческую ценность лишь тогда, когда она может быть стандартизирована и связана с конкретными правами, ограничениями и обязанностями. Поэтому для её использования в кадастре необходимо определить ориентир линии, эталон уровня воды, систему координат, момент определения и цель использования. Подвижность береговой линии означает, что задача геодезии состоит не только в фиксации её положения, но и в обеспечении сопоставимости, актуализации и прикладной пригодности данных во времени.

Различие между типами береговой линии, часто встречающимися в исследованиях и управлении прибрежной зоной, показано на рис. 1.

Примечание. На рисунке а) показаны управленческая, морфологическая, приливная береговые линии и мгновенный урез воды; рисунок б) иллюстрирует их взаимное положение на поперечном профиле берега. Рисунок а составлен автором по снимку Sentinel-2 MSI, рисунок б адаптирован по [7].

С точки зрения управления морским пространством концепция морского кадастра демонстрирует, что кадастровые принципы расширяются с суши на море и прибрежную зону. В рамках такого подхода морской кадастр – это не просто карта морских границ, а информационная система, обслуживающая управление правами, интересами, ограничениями, обязанностями и функциональными зонами в морском и прибрежном пространстве [8]. При этом береговая линия и базовые линии имеют

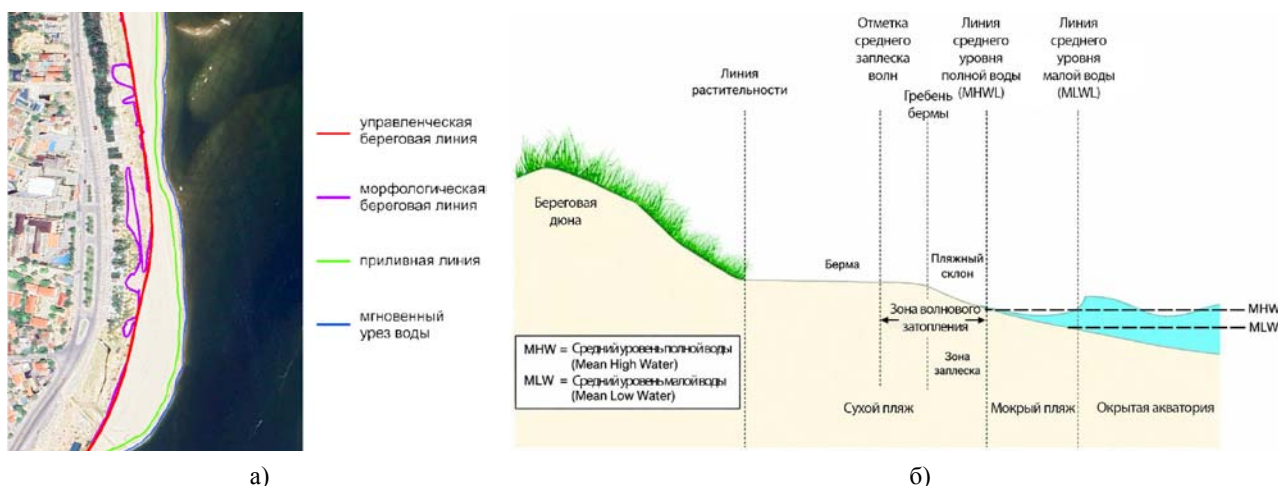


Рис. 1. Различие между основными типами береговой линии

а) – примеры выделения основных типов береговой линии на спутниковом снимке прибрежной зоны с песчаным пляжем и растительностью;

б) – схематическое положение различных типов береговой линии на поперечном профиле берега

фундаментальное значение, поскольку от них отсчитываются многие управленческие и юридические границы. Прямое следствие этого таково: если береговая линия определена непоследовательно, без привязки к опорной поверхности или без указания времени и метода определения, то вся последующая цепочка управленческих данных теряет свою ценность.

Таким образом, можно сделать важный теоретический вывод: данные о береговой линии имеют кадастровую ценность только при одновременной стандартизации ориентира линии берега, эталона уровня воды, системы координат, момента определения и цели использования. Это и является методологической основой для рассмотрения международного опыта и его сопоставления с текущей ситуацией во Вьетнаме.

Опыт некоторых стран

Российская Федерация. Опыт Российской Федерации имеет особое значение для данного исследования не только в силу исторической близости научных традиций в области геодезии и кадастра, но и потому, что Россия служит показательным примером того, как береговая линия может рассматриваться в качестве составной части государственной регистрационно-кадастровой системы. В российской правовой системе и системе пространственной информации описание положения береговой линии (границы водного объекта) рассматривается не как отдельная картографическая операция, а как элемент официального управления водным объектом и прилегающей к нему территорией. Это позволяет сформулировать важное положение: береговая линия приобретает высокую управленческую ценность лишь тогда, когда она включена в государственную систему данных, а не существует только как самостоятельный продукт съемки.

В России развивается и более широкий подход,

связанный с государственным кадастром береговой зоны и кадастром морских берегов, что смещает акцент с наблюдения абразии и аккумуляции на организацию пространственных данных для управления [9,10]. При этом ценность данных о береговой линии определяется не только их геометрической точностью, но и возможностью их включения в систему государственного управления; в прикладном плане развиваются и БПЛА-технологии мониторинга литорали [11].

США. В Соединенных Штатах данные о береговой линии приобретают управленческое значение не на основе отдельного снимка или произвольного съемочного продукта, а благодаря их привязке к официальной базовой линии США и системе официальных морских навигационных карт NOAA. Это отражает весьма четкий принцип: береговая линия может служить основой для юридических и управленческих пределов лишь тогда, когда она опирается на официальный стандарт данных, обладающий установленными правилами определения и возможностью проверки. В этом состоит принципиальное отличие от подхода, при котором береговая линия рассматривается лишь как результат наблюдения за изменчивостью.

На этой основе в США развивается морской кадастр как интегрированная пространственная информационная система для управления морским пространством. В рамках этой системы данные о береговой линии не существуют изолированно, а выступают как элемент информационной инфраструктуры, обеспечивающей управление правами, зонами использования, ограничениями, функциональными зонами и решениями, относящимися к морскому и прибрежному пространству. Иными словами, американский опыт показывает, что значение определения береговой линии не исчерпывается задачей съемки, а начинается с того момента, когда

соответствующие данные организуются для использования в системе управления.

Из опыта США можно вывести важное положение: управленческая ценность данных о береговой линии определяется не только технической точностью, но прежде всего тем, что эти данные стандартизированы, официально закреплены и встроены в информационную архитектуру, обслуживающую процесс принятия решений. Именно поэтому США представляют собой характерный пример перехода от картографирования береговой линии к управлению, основанному на данных о береговой линии.

Новая Зеландия. Если США демонстрируют роль официальных данных в морском управлении, то Новая Зеландия служит показательным примером институционализации водных границ непосредственно в рамках кадастровой съёмки. В руководящих документах LINZ водные границы рассматриваются как особая группа границ, требующая от кадастрового съёмщика не только определения геометрического положения уреза воды, но и идентификации, описания и представления границы в строгом соответствии с кадастровыми правилами. Это означает, что береговая линия понимается не как природная линия, подлежащая лишь измерению, а как особый вид границы, который должен обрабатываться в соответствии с управленческими и правовыми нормами.

Наиболее существенной чертой новозеландского опыта является четкое признание динамического характера водных границ. Кадастровая система этой страны не исходит из предпосылки, что водные границы являются неизменными линиями, а требует, чтобы материалы съёмки отражали как точность определения, так и возможность смещения границы. Тем самым Новая Зеландия не пытается исключить нестабильность береговой линии из кадастровой практики, а, напротив, включает эту нестабильность в механизм управления посредством съёмки, описания, юридических доказательств и кадастровых данных. Это чрезвычайно важный подход: современный кадастр не противопоставляет себя динамике береговой линии, а вырабатывает процедуры управления этой динамикой.

Методологический урок, вытекающий из опыта Новой Зеландии, состоит в следующем: для стран с подвижным побережьем вопрос заключается не в том, чтобы ждать достижения береговой линией абсолютно стабильного состояния, а в том, чтобы выстроить систему, в рамках которой береговая линия может обследоваться, стандартизироваться и обновляться даже в условиях ее смещения.

Обобщая международный опыт, следует отметить, что береговая линия приобретает управленческую ценность только как стандартизированная граница, определяемая по установленным техническим и правовым правилам. Её использование в кадастре

и управлении требует указания опорной поверхности, происхождения данных, момента определения и юридической цели. Для Вьетнама это означает необходимость перехода от повышения точности извлечения береговой линии к выстраиванию технологико-управленческой логики её стандартизации и интеграции в систему управления.

Современное состояние исследований и практического применения во Вьетнаме

В настоящее время кадастровая и геодезическая деятельность во Вьетнаме осуществляется в рамках государственной системы управления земельными ресурсами и кадастра, а прибрежные территории рассматриваются как часть общей системы пространственного и земельного учета. Для них используются действующие кадастровые и топографо-геодезические материалы, наземные геодезические измерения, спутниковые наблюдения ГНСС и государственная координатно-высотная основа. Действующая нормативно-техническая база Вьетнама определяет общие требования к кадастровым и геодезическим работам, однако применительно к береговой линии и прибрежной зоне сохраняется проблема перехода от традиционных кадастровых и геодезических работ к систематическому мониторингу и формированию данных, пригодных для кадастрового описания подвижной границы.

Для Вьетнама береговая линия имеет значение в контексте кадастрового деления прибрежной зоны, установления границ землепользования и учета прибрежных земель. Хотя в кадастровых и геодезических работах применяются наземные измерения, ГНСС и топографо-геодезические материалы, эти данные пока не образуют единой системы регулярного обновления, ориентированной на нужды прибрежного кадастра. В последние годы исследования береговой линии во Вьетнаме быстро развиваются, однако в большинстве случаев данные по-прежнему рассматриваются главным образом как индикатор геоморфологических изменений, а не как объект кадастрового управления.

Так, Данг Кинь Бак (2024) применил искусственный интеллект для мониторинга изменений побережья Центрального Вьетнама [12]; Чинь Ле Хунг и соавторы (2024) использовали снимки спутника Sentinel-2 MSI для оценки изменений береговой линии побережья провинции Тханьхоа за период 2015-2023 гг. с приведением результатов к единому приливному уровню [13]. Эти исследования показывают, что отечественные технические возможности заметно продвинулись в области автоматизации распознавания, выбора индикаторов и стандартизации условий наблюдений. Однако их результаты по-прежнему в основном ограничиваются картами изменений, анализом абразии и аккумуляции, а также мониторингом прибрежного пространства и еще не трансформируются в слой данных,

непосредственно предназначенный для прибрежно-го кадастра.

Сопоставление вьетнамской ситуации с международными моделями показывает, что связь между мониторингом береговой линии и управлением прибрежными земельными ресурсами пока не оформлена в виде единой последовательной цепочки. Такая цепочка должна включать выбор типа береговой линии, стандартизацию по уровню воды и системе координат, получение данных комплексом геодезических технологий, оценку точности и механизм их использования для конкретных кадастровых и управленческих целей. Следовательно, во Вьетнаме быстрее развивается технологический уровень мониторинга, чем уровень стандартизации и управленческой интеграции данных.

Данный вывод согласуется и с тем обстоятельством, что действующие во Вьетнаме документы и инструменты управления в основном акцентируют внимание на защитных прибрежных полосах, планировании, предотвращении стихийных бедствий, намыве территорий (создании искусственных земельных участков) и контроле изменений пространственной структуры прибрежной зоны, а не на четко сформированной в терминологическом и процедурном отношении рамке в рамках концепции прибрежного кадастра или морского кадастра. Это не означает, что у Вьетнама отсутствуют предпосылки для развития в данном направлении; напротив, это

показывает, что процесс перехода от мониторинга береговой линии к использованию данных о береговой линии для нужд прибрежного кадастра все еще находится на начальной стадии, в рамках которой технологии развиваются быстрее, чем возможности их управленческой интеграции.

На основе вышеизложенного анализа текущую ситуацию во Вьетнаме можно обобщить центральным тезисом данного раздела: она носит характер асинхронности. Технологический потенциал мониторинга береговой линии стремительно растет, в то время как рамка интеграции данных о береговой линии в систему кадастрового управления прибрежными территориями развивается значительно медленнее. Именно эта асинхронность служит непосредственным научным основанием для утверждения о необходимости совершенствования геодезических технологий мониторинга береговой линии в интересах прибрежного кадастра на современном этапе.

Сравнение, оценка и обсуждение

На основе проведенной диагностики современного состояния во Вьетнаме сопоставление с Российской Федерацией, США и Новой Зеландией позволяет более отчетливо выявить методологическую природу существующего разрыва.

Указанное различие может быть обобщено в табл. 1.

Таблица 1 показывает, что различие между

Таблица 1

Сопоставление опыта некоторых стран и современного состояния Вьетнама в использовании данных о береговой линии для целей прибрежного кадастра

Критерий	Российская Федерация	США	Новая Зеландия	Вьетнам
Понимание береговой линии / водной границы	Береговая линия увязана с описанием границы водного объекта в системе управления	Официальная базовая линия служит основой для установления морских пределов	Водная граница рассматривается как кадастровая граница, способная иметь подвижный характер	Преимущественно рассматривается как объект мониторинга изменений, абразии и аккумуляции
Источник / стандарт определения	Документы и нормативы, регулирующие сведения о границах водных объектов в системе Росреестра	Официальные навигационные карты NOAA, линия наименьшего отлива, нормальная исходная линия	Правила кадастровой съёмки и оценка доказательств положения границы	Данные дистанционного зондирования, БПЛА, DSAS, ГИС, методы глубокого обучения
Основное назначение	Интеграция сведений в регистрационно-кадастровую систему и управление прибрежной зоной	Установление морских пределов и управление морским пространством	Кадастровая съёмка и управление границами	Мониторинг изменений, поддержка предупреждения стихийных бедствий и управления прибрежной зоной
Степень интеграции в систему управления	Имеется правовая и информационная основа, хотя подходы остаются разнообразными	Чётко выражена; реализуется в системе морского кадастра и в практике управления морскими границами	Чётко выражена, непосредственно встроена в систему кадастровой съёмки	Существует нормативная база в сфере управления прибрежной зоной, однако чёткая модель прибрежного и морского кадастра пока не сформирована
Урок для Вьетнама	Необходимо увязать описание береговой линии с государственной системой управления и кадастровой информацией	Необходимы официальные данные, стандартизованная опорная поверхность и метаданные	Необходимо чётко определить тип береговой линии для кадастровых целей	Необходим переход от разрозненного мониторинга к комплексному геодезическому обеспечению и управленческой интеграции данных о береговой линии

Вьетнамом и международными моделями связано не столько с самими технологиями мониторинга, сколько со способом организации данных для целей управления. Основной пробел Вьетнама носит интеграционный характер: пока не сформирован единый слой данных о береговой линии для кадастровых целей с установленными процедурами съемки, стандартизации, обновления и использования. Поэтому ключевая задача состоит уже не только в мониторинге береговой линии, а в преобразовании результатов мониторинга в данные, пригодные для прибрежного кадастра.

Исходя из приведенных выводов, сравнительный анализ позволяет сформулировать обобщающее положение: Вьетнам в настоящее время уже располагает относительно благоприятной технической базой, однако ему по-прежнему недостает методологического перехода к кадастровому и административному использованию данных о береговой линии. Именно этот переход определяет, будут ли данные о береговой линии использоваться как информационная основа прибрежного кадастра или останутся лишь самостоятельным продуктом наблюдений. В этом смысле главная ценность международного опыта для Вьетнама состоит не в предоставлении модели, которую можно было бы механически вос-

произвести, а в указании на необходимые условия, при которых данные о береговой линии приобретают управленческую ценность: стандартизация, институционализация и системная интеграция.

На основе обобщения международного опыта и результатов анализа современного состояния во Вьетнаме процесс перехода от мониторинга береговой линии к геодезическому обеспечению прибрежного кадастра может быть представлен в обобщенном виде на рис. 2.

Рис. 2 показывает, что управленческая ценность мониторинга береговой линии зависит не только от этапа получения данных, но и от последующих этапов, таких как выбор типа береговой линии, соответствующего цели использования, стандартизация опорной поверхности, уровня воды и системы координат, а также наличие геодезически обоснованной схемы получения, проверки и использования пространственных данных, нормирование допустимых погрешностей и интеграция в систему управления прибрежными земельными ресурсами. Соответственно, недостающее звено в современной вьетнамской практике находится уже не столько в области технологий наблюдений, сколько на этапе сопряжения данных о береговой линии с архитектурой управления прибрежным пространством.

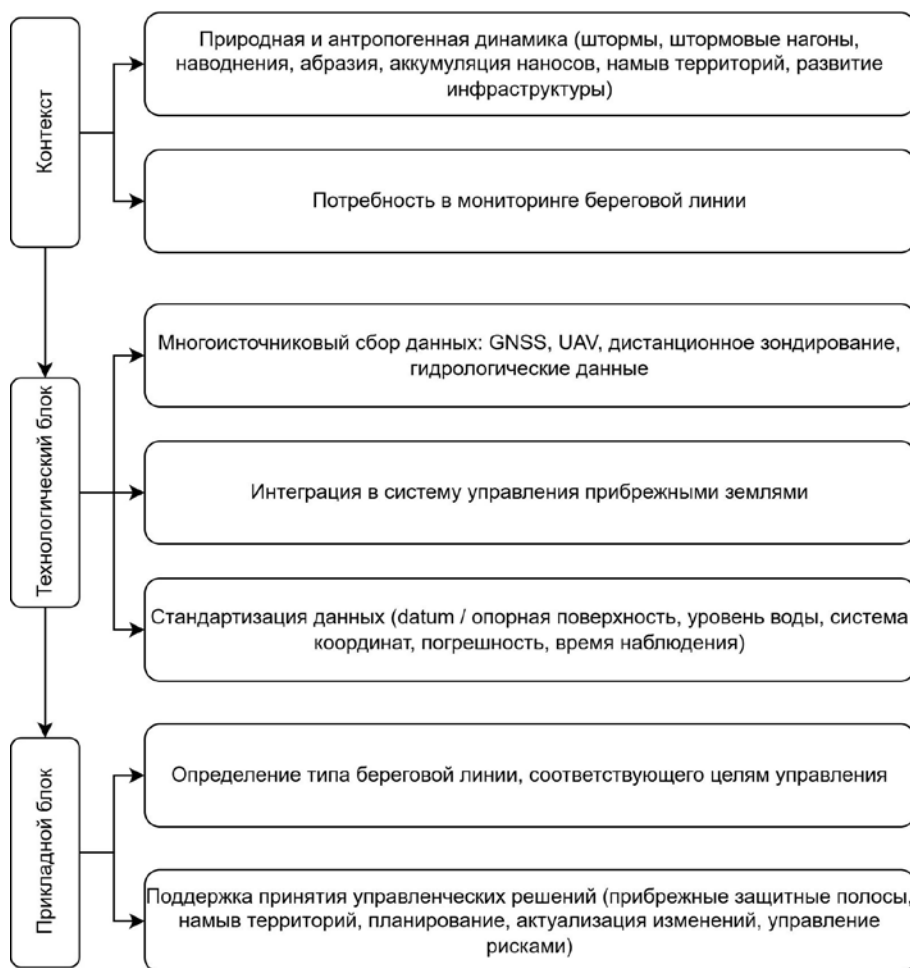


Рис. 2. От мониторинга береговой линии к геодезическому обеспечению прибрежного кадастра

Именно это и служит основанием для перехода к обсуждению направлений развития для Вьетнама в следующем разделе.

Направления развития для Вьетнама

Исходя из приведенных выводов, для Вьетнама могут быть определены четыре приоритетных направления.

Первое направление заключается в стандартизации объекта береговой линии в зависимости от цели использования. В современной практике береговая линия может пониматься по-разному: как мгновенный урез воды, приливная линия, морфологическая береговая линия, внутренняя береговая линия, внешняя береговая линия или граница, используемая для установления прибрежной защитной полосы. Поэтому, если не будет четко определено, какой именно тип береговой линии должен использоваться для решения той или иной управленческой задачи, даже данные с высокой технической точностью вряд ли смогут применяться последовательно и единообразно. В этой связи одним из приоритетных требований для Вьетнама является разработка системы критериев выбора типа береговой линии, соответствующего таким группам задач, как экологический мониторинг, управление прибрежной защитной полосой, контроль намыва территорий и обеспечение прибрежного кадастра.

Второе направление состоит в интеграции пространственных данных из различных источников в рамках единой схемы геодезического обеспечения и стандартизации условий сопоставления данных о береговой линии. Для прибрежных территорий один источник данных, как правило, недостаточен для полноценного отражения состояния берега, особенно в условиях влияния приливов, волнения, штормов и быстрых морфологических изменений. Поэтому целесообразным направлением развития является сочетание ГНСС, данных наземных геодезических измерений, БПЛА, спутниковых снимков, цифровых моделей рельефа, данных об уровнях воды и полевых обследований с целью формирования более надежных слоев данных о береговой линии [14]. Однако техническая интеграция имеет смысл лишь тогда, когда она сопровождается стандартизацией времени наблюдений, системы координат, опорной поверхности и метаданных, чтобы многовременные результаты были сопоставимы и пригодны для использования в управлении.

Третье направление связано со стандартизацией процедуры оценки геодезической точности и качества данных о береговой линии. Если во многих современных исследованиях погрешность обычно рассматривается как вспомогательный технический параметр, то в контексте прибрежного кадастра она должна рассматриваться как условие, определяющее допустимость и возможность использования данных. В связи с этим необходимо разработать про-

цедуру оценки качества данных о береговой линии, непосредственно увязанную с управленческими целями, в рамках которой одновременно учитывались бы влияние источника изображения, приливных условий, времени съемки, качества цифровой модели рельефа и методов дешифрирования снимков.

Четвертое направление заключается в формировании механизма включения данных о береговой линии как геодезически обоснованного пространственного слоя в систему управления прибрежным пространством. Именно здесь проходит принципиальное различие между результатом научного исследования и компонентом инфраструктуры государственных управленческих данных [15]. Если данные о береговой линии существуют лишь в виде результатов отдельных научно-исследовательских работ (НИР) или самостоятельных проектов, их долговременная практическая ценность будет весьма ограниченной. Напротив, если будет сформирована процедура проверки, стандартизации, хранения и обновления данных о береговой линии в национальной базе пространственных данных либо в системах управления земельными ресурсами и прибрежной зоной, тогда мониторинг береговой линии действительно сможет стать составной частью системы управления земельными ресурсами в широком смысле.

В долгосрочной перспективе, опираясь на четыре указанных направления, Вьетнам может рассмотреть возможность формирования информационно-кадастровой рамки прибрежной зоны как одного из направлений дальнейшего развития, а не как немедленно реализуемой законченной системы, соответствующей национальным условиям. Это не означает механического копирования морского кадастра США или новозеландской рамочной модели водных границ, а предполагает выбор подхода, совместимого с земельным законодательством, природными особенностями прибрежной зоны и действующей системой управления во Вьетнаме. В рамках такой системы данные о береговой линии должны быть связаны с прибрежной защитной полосой, территориями намыва, фактическим использованием прибрежных земель, зонами природных рисков и другими слоями управленческих данных.

Именно в этом направлении совершенствование геодезических технологий мониторинга береговой линии сможет в полной мере превратиться из сугубо технической задачи в инструмент поддержки управления прибрежными земельными ресурсами и пространственной организации прибрежной зоны.

Выводы

Береговая линия представляет собой особый пространственный объект, характеризующийся высокой динамичностью, поэтому ее определение и мониторинг не могут рассматриваться исключительно как задача геометрической съемки. Данные о

береговой линии приобретают реальную управленческую ценность лишь при условии их стандартизации по индикатору береговой линии, уровню воды, системе отсчета, моменту определения и цели использования.

Опыт Российской Федерации, США и Новой Зеландии показывает, что современная тенденция развития уже не ограничивается мониторингом береговой линии, а заключается в использовании данных о береговой линии как компонента информационной инфраструктуры для территориального управления и управления морским пространством. В то же время современное состояние во Вьетнаме свидетельствует о том, что технологии мониторинга береговой линии развиваются быстро, однако переход от наблюдательных данных к данным, предна-

значенным для прибрежного кадастра, еще не привел к формированию целостной интегрированной системы.

Следовательно, основной пробел Вьетнама в настоящее время заключается не в недостатке инструментов мониторинга, а в отсутствии рамки стандартизации и интеграции, способной преобразовывать данные о береговой линии в информационную основу для управления прибрежными земельными ресурсами. В связи с этим дальнейшие исследования должны быть сосредоточены на разработке единой геодезико-технологической и управленческой рамки, способной обеспечить взаимосвязь между съемкой, наблюдением, стандартизацией, обновлением и использованием данных в управлении прибрежной зоной.

Список литературы

1. Ознамец В.В., Дегбенон О.П.А. Geodetic support of monitoring of the coastline (on the example of the coast of the Atlantic Ocean of the Republic of Benin). *Geodesy and Aerophotosurveying*. 2018. Vol. 62. No. 3. Pp. 249-256. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-3-249-256.
2. Di Paola G., Rodríguez G., Roskopf C.M. Shoreline Dynamics and Beach Erosion. *Geosciences*. 2023. Vol. 13. No. 3. Pp. 74. DOI: 10.3390/geosciences13030074.
3. Murray-O'Connor H., Cooper J.A.G. On the centrality of tenure in spatial data systems for coastal/marine management: International exemplars versus emerging practice in Ireland. *Ocean & Coastal Management*. 2024. Vol. 257. 107309. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2024.107309.
4. Hanus P., Benduch P. Shoreline as the Boundary of a Property in the Cadastre. *Civil and Environmental Engineering Reports*. 2025. Vol. 35. No. 3. Pp. 94-107. DOI: 10.59440/ceer/205540.
5. Ознамец В.В. Пространственная съемка и моделирование с использованием беспилотных летательных аппаратов // Образовательные ресурсы и технологии. 2020. №1(30). С. 83-91. DOI: 10.21777/2500-2112-2020-1-83-91.
6. Boak E.H., Turner I.L. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*. 2005. No. 214. Pp. 688-703. DOI: 10.2112/03-0071.1.
7. Titus J.G. Rolling Easements. 2.2 Preserve Access along the Shore [Электронный ресурс]. URL: <https://papers.risingsea.net/rolling-easements-2-2-1.html> (дата обращения: 05.04.2026).
8. Atulukwu Y.H., Hassan M.I., Abdul Rahman A. 3D Temporal approach for coastal cadastre based on LADM. *Survey Review*. 2025. Vol. 57. No. 405. Pp. 539-554. DOI: 10.1080/00396265.2025.2544401.
9. Гогоберидзе Г.Г. и др. Кадастр морских берегов России: заделы, проблемы, перспективы // Океанологические исследования. 2024. Т. 52. №2. С. 183-205. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).10.
10. Ознамец В.В. Геодезическое обеспечение пространственного моделирования // Славянский форум. 2024. №1(43). С. 347-360.
11. Tsvetkov V.Ya., Oznamets V.V. Littoral monitoring using unmanned aerial vehicle. *Geodesy and Cartography*. 2020. No. 5. Pp. 2-10. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-959-5-2-10.
12. Dang K.B. Application of Artificial Intelligence for Monitoring Shoreline Changes in the Central Coast of Vietnam. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*. 2024. Vol. 40. No. 1. Pp. 82-97. DOI: 10.25073/2588-1094/vnuess.5012.
13. Trinh L.H., Le T.G., Tran X.B., Tran Q.V., Le V.P., To T.P. Monitoring of coastline change using Sentinel-2 MSI data. A case study in Thanh Hoa Province, Vietnam. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*. 2024. No. 26. Pp. 77-87. DOI: 10.12775/bgeo-2024-0006.
14. Цветков В.Я., Ознамец В.В. Большие данные в геодезическом обеспечении // Геодезия и картография. 2022. №10. С. 9-19. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-988-10-9-19.
15. Ознамец В.В. Геодезическое обеспечение как геосервис // Славянский форум. 2020. №2(28). С. 237-245.

References

1. Oznamets V.V., Degbenon O.P.A. Geodetic support of monitoring of the coastline (on the example of the coast of the Atlantic Ocean of the Republic of Benin). *Geodesy and Aerophotosurveying*. 2018. Vol. 62. No. 3. Pp. 249-256. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-3-249-256.
2. Di Paola G., Rodríguez G., Roskopf C.M. Shoreline Dynamics and Beach Erosion. *Geosciences*. 2023. Vol. 13. No. 3. Pp. 74. DOI: 10.3390/geosciences13030074.
3. Murray-O'Connor H., Cooper J.A.G. On the centrality of tenure in spatial data systems for coastal/marine management: International exemplars versus emerging practice in Ireland. *Ocean & Coastal Management*. 2024. Vol. 257. 107309. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2024.107309.
4. Hanus P., Benduch P. Shoreline as the Boundary of a Property in the Cadastre. *Civil and Environmental Engineering Reports*. 2025. Vol. 35. No. 3. Pp. 94-107. DOI: 10.59440/ceer/205540.
5. Oznamets V.V. Spatial survey and modelling using unmanned aerial vehicles. *Obrazovatel'nyye resursy i tekhnologii*. 2020. No. 1(30). Pp. 83-91. DOI: 10.21777/2500-2112-2020-1-83-91.
6. Boak E.H., Turner I.L. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*. 2005. No. 214. Pp. 688-703. DOI: 10.2112/03-0071.1.
7. Titus J.G. Rolling Easements. 2.2 Preserve Access along the Shore [Electronic resource]. URL: <https://papers.risingsea.net/rolling-easements-2-2-1.html> (accessed: 05.04.2026).

8. Atulukwu Y.H., Hassan M.I., Abdul Rahman A. 3D Temporal approach for coastal cadastre based on LADM. Survey Review. 2025. Vol. 57. No. 405. Pp. 539-554. DOI: 10.1080/00396265.2025.2544401.
9. Gogoberidze G.G. et al. Coastal Cadastre of the Russian Federation: Basis, Problems, Prospects. *Okeanologicheskie issledovaniya*. 2024. V. 52. No. 2. Pp. 183-205. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2024.52(2).10.
10. Oznamets V.V. Geodetic support of spatial modelling. *Slavyanskiy forum*. 2024. No. 1(43). Pp. 347-360.
11. Tsvetkov V.Ya., Oznamets V.V. Littoral monitoring using unmanned aerial vehicle. *Geodesy and Cartography*. 2020. No. 5. Pp. 2-10. DOI: 10.22389/0016-7126-2020-959-5-2-10.
12. Dang K.B. Application of Artificial Intelligence for Monitoring Shoreline Changes in the Central Coast of Vietnam. *VNU Journal of Science: Earth and Environmental Sciences*. 2024. Vol. 40. No. 1. Pp. 82-97. DOI: 10.25073/2588-1094/vnuces.5012.
13. Trinh L.H., Le T.G., Tran X.B., Tran Q.V., Le V.P., To T.P. Monitoring of coastline change using Sentinel-2 MSI data. A case study in Thanh Hoa Province, Vietnam. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*. 2024. No. 26. Pp. 77-87. DOI: 10.12775/bgeo-2024-0006.
14. Tsvetkov V.Ya., Oznamets V.V. Big data in geodetic support. *Geodeziya i kartografiya*. 2022. No. 10. Pp. 9-19. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-988-10-9-19.
15. Oznamets V.V. Geodetic support as a geoservice. *Slavyanskiy forum*. 2020. No. 2(28). Pp. 237-245.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Данг Тхань Нам

аспирант, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», 105064, Москва, Россия

Ознамец Владимир Владимирович

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», 105064, Москва, Россия

Information about authors
Affiliations

Dang Thanh Nam

Postgraduate Student, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Oznamets Vladimir Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 07.04.2026 г.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ ЛАНДШАФТНОГО БЛАГОУСТРОЙСТВА В ГОРОДАХ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА АСТРАХАНИ

Желонкина Е.Э., Ваняев А.В., Лунина Е.Д.

Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

e-mail: ресурс-86@mail.ru

Авторами статьи предложено создание устойчивой экосистемы для улучшения мест проведения массовых мероприятий в г. Астрахани. Обосновано и предложено облагораживание малых архитектурных форм и фонтанов для оформления ландшафтных территорий. Дана характеристика почвенно-климатическим условиям региона как базис для подбора ассортимента растений. Были проведены аналитические исследования по озеленению и оформлению малых архитектурных форм в парках, скверах, площадях в советский период. Целью данного исследования является анализ ландшафтного благоустройства города Астрахани и описание концепции нового благоустройства с учетом новых тенденций. Результатами работы являются предложения по подбору растительного материала и переосмысление малых архитектурных форм для создания нового образа зеленой части Астрахани. Принципы, разработанные авторами, могут быть использованы для различных проектов ландшафтного благоустройства других городов и населенных пунктов.

Ключевые слова: обустройство ландшафта, подбор растений, малая архитектурная форма, микориза, фонтан, древесный ярус, травянистый ярус.

CONTEMPORARY APPROACHES TO URBAN LANDSCAPING USING THE EXAMPLE OF THE CITY OF ASTRAKHAN

Zhelonkina E.E., Vanyaev A.V., Lunina E.D.

State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

The authors of the article proposed the creation of a sustainable ecosystem to improve the venues for mass events in the city of Astrakhan. The article substantiates and proposes the improvement of small architectural forms and fountains for the design of landscape areas. The authors describe the soil and climatic conditions of the region as a basis for selecting plant species. The article also provides an analysis of the landscaping and design of small architectural forms in parks, squares, and squares during the Soviet period. The purpose of this study is to analyze the landscape design of the city of Astrakhan and describe the concept of new design based on current trends. The results of the work include proposals for the selection of plant material and the rethinking of small architectural forms in order to create a new image of the green part of Astrakhan. The principles developed by the authors can be used for various landscape improvement projects in other cities and settlements.

Keywords: landscape design, plant selection, small architectural forms, mycorrhiza, fountain, tree layer, herbaceous layer.

В настоящее время серьезно стоит вопрос о благоустройстве городов, их озеленения, для комфортного социально-общественного труда и гармоничного проживания. В рамках данного исследования внимание уделяется изучению исторического материала благоустройства и озеленения советского периода. В круг задач входит анализ подходов к формированию зеленых насаждений в разные десятилетия, рассмотрение методов высадки и принципов создания архитектурных и растительных композиций, изучение критериев подбора видового состава растений, а также оценка малых архитектурных форм. В работе выделены два основных направления: первое направление посвящено определению и обустройству видовой точки в рекреационной зоне с разработкой предложений по подбору растительного материала; второе направление предполагает создание лесозащитной зоны по периметру города Астрахани, опираясь на исторический пример аллеи Раппопорта, заложенной в 1934 году.

На основе современных данных нами выявлены ключевые тенденции последних лет: переход к

многолетним культурам, использование декоративных злаков, хвойных растений и экзотов (гибискус, краснолиственные клены), устойчивых к стрессовым факторам городской среды. Делается вывод о смене озеленения, переход к созданию устойчивых, архитектурно-выразительных композиций. При этом сохраняются нерешенные проблемы, связанные с водоснабжением зеленых насаждений, неблагоприятными почвенными условиями, а малые архитектурные формы нуждаются в реконструкции.

Город Астрахань, расположен в уникальных природных условиях Прикаспийской низменности, является ярким примером города, где антропогенная нагрузка сочетается с экстремальными факторами природной среды. Цветочное оформление территорий выполняет не только эстетическую, но и важную средообразующую и санитарно-гигиеническую функцию. Однако, высокая инсоляция, дефицит осадков и специфические почвы (бурые, солонцеватые, пойменные луговые с высоким содержанием глинистых фракций) предъявляют жесткие требования к ассортименту растений и агротехнике.

Цель данной работы – провести сравнительный анализ подходов к цветочному оформлению г. Астрахани в советское время и на современном этапе. Изучить произошедшие изменения в ассортиментной политике, используемых материалах, композиционных решениях. Реанимировать нереализованные проекты прошлого и предложить меры улучшения сложившейся ситуации в городе.

Территория Астрахани относится к зоне полупустыни с резко-континентальным климатом. Для региона характерна высокая годовая амплитуда температур: средняя температура июля составляет +25.6°C, а абсолютный максимум достигает +41°C, что в сочетании с низкой влажностью воздуха создает эффект иссушающей «воздушной засухи». Зима малоснежная, с частыми оттепелями, что осложняет перезимовку некоторых культур. Почвенный покров города неоднороден, представлен бурыми полупустынными, солончаковыми и солонцеватыми почвами. В Волго-Ахтубинской пойме и на прилегающих территориях распространены тяжелые по гранулометрическому составу пойменные луговые почвы. Эти факторы делают обязательными мероприятия по улучшению плодородия структуры почвы (внешение песка, органики и др.).

Фундамент, на котором строилось лесоразведение в XX веке, составляли виды, исторически произраставшие в пойме Волги и прилегающих территориях. Среди них можно выделить виды типичные для советского периода г. Астрахани: древесный ярус представлен: робинией (*Robinia pseudoacacia*), тутовником (*Moraceae*), лохом узколиственным (*Elaeagnus angustifolia*), видами клена (*Acer*), тополя (*Populus*) и др. В кустарниковом ярусе преобладали сирень (*Syringa*), жимолость (*Lonicera*), розы (*Rosa*). Древесные виды сажали в основном для создания тени и пылезащиты (преимущественно тополя и клены), то сейчас приоритет сместился в сторону декоративности и разнообразия пород. Программы последних лет нацелены на то, чтобы придать облику Астрахани черты южного курортного города. В настоящее время ассортимент древесных пород и кустарников мало чем отличается от времен советского союза, хоть и пытаются ввести новые виды насаждений, такие как бирючина (*Ligustrum vulgare*), спирея (*Rosaceae*), пузыреплодник (*Physocarpus opulifolius*), калина (*Viburnum opulus*), боярышник (*Crataegus laevigata*), барбарис (*Berberis vulgaris*), гортензия (*Hydrangea*), можжевельник (*Juniperus*), кизильник (*Cotoneaster*), самшит (*Buxus*), вейгел (*Weigela*), скумпия (*Cotinus coggygria*), буддлея (*Buddleja*).

Ассортимент цветочных культур был относительно невелик и основывался на проверенных, неприхотливых однолетниках, дававших гарантированный декоративный эффект при минимальных затратах. Приоритет отдавался растениям, устойчи-

вым к засухе и высоким температурам. Основу цветочного оформления составляли: бархатцы (*Tagetes*), циннии (*Zinnia*), агератум (*Ageratum*), колеус (*Coleus*), петуния (*Petunia*). Цветники высаживали преимущественно сезонные, многолетние культуры использовались крайне редко, уступая место ежегодно обновляемым «ковровым» посадкам. Анализ современных цветочных насаждений Астрахани показывает следующие предпочтения в видовом составе: розы, которые активно используются в центральных клумбах, цинерарии – применяются для создания бордюров и фоновых посадок.

В настоящее время ведется работа по размножению декоративных кустарников для живых изгородей, для обеспечения потребности города в посадочном материале и создания архитектурных форм озеленения. Современная стратегия озеленения предполагает высадку саженцев высотой от 3 до 4.5 метров. Такие деревья лучше приживаются, быстрее формируют законченный облик пространства и, что немаловажно, менее подвержены вандализму. Часть материала закупается в других регионах (например, краснолистные клены из Краснодара), однако, приоритет отдается местному посадочному материалу. Большая часть растений для городского озеленения производится непосредственно в муниципальном лесном хозяйстве и городском питомнике. Это гарантирует лучшую приживаемость, так как саженцы адаптированы к местному климату и почвам. Несмотря на позитивные сдвиги, ситуация с зелеными насаждениями и озеленением в целом в городе остается сложной. Можно выделить несколько проблем:

- В городе доминируют стареющие древесные насаждения, видовая структура остается бедной;

- Основной массив составляют все те же ясени, вязы, клены и тополя. При этом ясень пенсильванский и клен американский признаны агрессивными чужеродными видами, которые не только не украшают город, но и угнетают любую другую растительность под своими кронами;

- Дефицит парков и скверов, а также обилие бестеневых участков вдоль магистралей и набережных, где новые посадки оказываются под прямым палящим солнцем без должной защиты;

- Выгорание газонной растительности – одна из наиболее острых и заметных проблем Астрахани;

- Цветники страдают от нерегулярного полива в летний период и от вымерзания теплолюбивых культур в бесснежные зимы.

Наиболее масштабным неосуществленным ландшафтным проектом прошлого времени в Астрахани можно считать план создания вокруг города зеленого пояса, разработанный в 1952 году, согласно проекту, пять рядов деревьев должны были высадить вдоль железной дороги на всем протяжении юго-восточной стороны. Так же планировались

зеленые насаждения у восточной границы и на северо-востоке, основная цель заключалась в снижении интенсивности ветра и пыли, что для Астрахани крайне актуально. Программа озеленения городов СССР была принята еще в 1930-е годы, и вокруг некоторых городов такие пояса действительно появились. Однако в городе Астрахань работы так и не начались. В 2020 году после очередной сильной пыльной бури, вновь возник вопрос о создании зеленой зоны. Ректор Астраханского государственного архитектурно-строительного университета предложил учредить некоммерческий фонд «Дыши, Астрахань!». В 2023 году председатель городского парламента предложил, программу «Зеленого города», однако проекты так и не были осуществлены. В последние два года в Астрахани реализуется масштабная программа по обновлению зеленого фонда. В рамках этих работ высаживаются крупномерные деревья высотой от трех до четырех с половиной метров, выращенные в местных питомниках. Эти мероприятия можно рассматривать как поэтапную реализацию давно назревшей потребности в обновлении городских насаждений.

В качестве ключевого объекта реконструкции нами рассматривалась «видовая точка» площадь имени Ленина, расположенная в историческом ядре Астрахани, в непосредственной близости от стен кремля. Данное общественное пространство обладает высокой градостроительной значимостью: оно пользуется стабильно высоким спросом у пешеходов, туристических групп и местных жителей, а также традиционно служит главной площадкой города для проведения массовых мероприятий различного формата. Исторический контекст места свидетельствует о его непреходящей ценности. Еще в 1969 году, в советский период, предпринимались активные попытки благоустройства ландшафта, разбивались цветники, высаживались древесно-кустарниковые породы, закладывались основы ландшафтного дизайна. Впоследствии на территории была проведена реконструкция фонтанного комплекса, которая была произведена в соответствии с технологиями, используемыми в то время. Вместе с тем внешний вид фонтана выбивается из общего архитектурного

контекста, что негативно влияет на общее впечатление от площади, тогда как современные фонтаны становятся более технологически продуманными [3]. Однако на сегодняшний момент наблюдается ряд существенных недостатков в содержании территории. Существующая растительность находится в состоянии сильного разрастания и утратила первоначальные декоративные формы. Газонная часть покрытия имеет значительные повреждения (выгорание, локальное разрушение дернового слоя), а малые архитектурные формы частично утратили свою эстетическую привлекательность и остро нуждаются в обновлении.

Учитывая современные тенденции ландшафтной архитектуры и подходы к озеленению городских пространств, предлагаем комплексную концепцию обновления площади, направленную на объединение исторической идентичности с современными стандартами комфорта. Ключевой идеей проекта становится визуальное и смысловое объединение пространства площади с доминантой города – Астраханским кремлем. Для достижения этого эффекта предлагается провести модернизацию фонтанного комплекса с добавлением новой перспективной точки обзора [2]. В оформлении бортового камня (бортиков) фонтанов планируется использовать стилистические элементы, отсылающие к архитектуре кремлевских башен. Это позволит создать целостный ансамбль, где исторический памятник и современное общественное пространство будут восприниматься в едином контексте. Деревянные элементы скамеек (ламели) предлагаем выполнить в цвете темного ореха, идентичного цвету кровли кремлевских башен (рис. 1). У стен кремля планируется размещение скамеек, оформленных в духе русского зодчества. Дополнительно рекомендуем использовать метод мульчирования у корневой системы дерева. Такое цветовое и стилистическое единство малых архитектурных форм с объектами культурного наследия позволит подчеркнуть уникальность места.

Учитывая интенсивную нагрузку на газоны и высокую инсоляцию характерную для астраханского климата, в проекте реконструкции необходимо



Рис. 1. Предлагаемое решение благоустройства площади Ленина с использованием МАФ

Таблица 1

Подбор растительного материала оформления клумбы на площади Ленина

№	Название растения. Сорт	Морозостойкость	Зимостойкость	Жаростойкость	Засухоустойчивость	Высота куста	Зона высаживания (USDA)	Период цветения
1	Роза чайно-гибридная 'Моника' <i>Rosa 'Monika'</i>	До -23 °С, зона 6	Высокая, до -23°С (устойчива к выпреванию, хорошо восстанавливается)	Высокая, до +40°С	Средняя	120-175 см	4 (от -34 до -29)	Июнь – сентябрь (повторноцветущая)
2	Роза чайно-гибридная 'Мир' <i>Rosa 'Mir' (Peace)</i>	До -20 °С, зона 6-7	Средняя, до -23°С (требует качественного укрытия, чувствительна к перепадам)	Высокая, до +32°С	Средняя	100-150 см	5–6	Июнь – сентябрь (повторноцветущая)
3	Роза чайно-гибридная 'Высший свет' <i>Rosa 'Vysshiy Svet'</i>	До -25 °С, зона 5-6	Высокая, до -23°С (стабильная, редко выпревает, хорошо переносит бесснежные зимы)	Высокая, до +40°С	Выше средней	60-100 см	6 (от -23 до -18)	Июнь – октябрь (обильное, продолжительное)

внедрение современной системы автоматического капельного орошения для газонных покрытий и цветников, что позволит решить проблему выгорания растительности, обеспечит равномерное увлажнение почвы и снизит трудозатраты на эксплуатацию зеленых зон. Также нами предлагается пересмотреть существующий дендроплан в ассортименте. Вместо разросшихся и утративших декоративность пород планируется внедрение новых, адаптированных к городской среде видов многолетников и цветущих кустарников. Подбор ассортимента ориентирован на продление сроков декоративности цветников, устойчивости к засухе.

В процессе наших исследований нами был подобран растительный материал для зеленого пояса (защитного кольца) с учетом современного видения ландшафтного благоустройства города Астрахань (рис. 2) (таб. 2).

Древесные виды подобраны с учетом климатических особенностей региона, что позволит сформировать устойчивую экосистему «Зеленого кольца» [3]. Одним из ключевых условий ее формирования станет внесение микоризных грибов (таб. 3), которые обеспечат стабильные процессы почвообразования. Добавление микоризы в посадочные ямы при посадке древесных растений запустит



Рис. 2. Предлагаемый вид реализации проекта «Зеленого кольца» в городе Астрахани

Таблица 2

Древесный ярус: ассортимент для защитных и декоративных насаждений

№	Вид	Морозостойкость / морозоустойчивость	Ветроустойчивость	Высота взрослого растения, м	Период цветения	Особенности вида
1	Тополь серебристый <i>Populus alba</i>	До -30°С	Высокая (гибкие ветви, мощная корневая система, устойчив к порывам)	15-20 (до 30)	Цветет в апреле – мае до распускания листьев (сережки)	Быстрорастущий, эффективен для создания ветрозащитных полос; мощная корневая система скрепляет почву

Таблица 2 (Продолжение)

2	Карагач (вяз мелколистный) <i>Ulmus parvifolia</i>	До -30°C, засухоустойчив	Высокая (плотная древесина, глубокая корневая система, редко страдает от ветровала)	10-15	Цветёт незаметно, в апреле – мае (мелкие обоеполые цветки)	Хорошо переносит стрижку; создаёт плотные ветрозащитные полосы, предотвращает ветровую эрозию
3	Акация белая (робиния лжеакация) <i>Robinia pseudoacacia</i>	До -25°C, но может подмерзать в суровые зимы	Средняя (древесина хрупкая, возможен ветролом при сильных ураганах; на открытых участках требует посадки группами)	12-18	Май – июнь (крупные душистые белые цветки в поникающих кистях)	Фиксирует азот; мощная корневая система препятствует эрозии; используется в полевых защитных полосах
4	Калина обыкновенная <i>Viburnum opulus</i>	До -35°C	Средняя (кустарниковая форма, ветви гибкие; при штамбовой форме может требовать опоры)	2-4 (кустарник)	Май – июнь (белые щитковидные соцветия)	Создаёт опушечные насаждения; эффективна для закрепления склонов и берегов; служит подлеском в защитных полосах
5	Терн (слива колючая) <i>Prunus spinosa</i>	До -35...-40°C	Высокая (густой куст с колючками, низкорослый, не подвержен ветровалу)	1.5-3	Апрель – май (обильное цветение белыми мелкими цветками до распускания листьев)	Идеален для создания живых изгородей и опушек; мощная корневая система и густой куст эффективно защищают от ветра и эрозии
6	Осина (тополь дрожащий) <i>Populus tremula</i>	До -40°C	Высокая (эластичная древесина, глубокие корни, устойчива к ветровалу)	15-25 (до 35)	Апрель – май	Очень морозостойка, даёт корневую поросль, закрепляет овраги
7	Можжевельник виргинский 'Глаука' <i>Juniperus virginiana</i> 'Glausa'	До -35°C	Высокая (глубокая стержневая корневая система, аэродинамичной формы кроны)	5-8	Цветёт в мае (микро- и макростробилы)	Дымо-, пыле- и газоустойчив, хорошо переносит городские условия

Таблица 3

Рекомендуемые микоризы для зеленого кольца в городе Астрахань

№	Микориза, плодовое тело	Особенности
1	Лисичка настоящая <i>Cantharellus cibarius</i>	Образует микоризу с дубом, березой, сосной. Устойчива к засухе, что важно для астраханского климата. Не червивеет.
2	Осиновый груздь (Подгруздок осиновый) <i>Lactarius controversus</i>	Микоризный партнёр осины, тополя, ивы. Встречается в увлажнённых местах, но в проекте можно использовать на поливных участках.
3	Рядовка фиолетовая <i>Lepista nuda</i>	Образует микоризу с сосной, елью, дубом, берёзой. Хорошо переносит засоление почвы – перспективна для Астрахани.
4	Рядовка лиловоногая (Синеножка) <i>Lepista personata</i>	Образует микоризу с ясенем и другими лиственными деревьями, часто растёт большими колониями. Требуется тщательной предварительной обработки.
5	Рогатик золотистый (Рамария золотистая) <i>Ramaria flava</i>	Образует микоризу с древесными породами в лиственных и хвойных лесах, растёт на почве и лесной подстилке. Плодовое тело хрупкое, имеет коралловидную форму. Занесен в красную книгу.
6	Тополевая рядовка (Подтопольник) <i>Tricholoma populinum</i>	Важный микоризный партнёр тополя (отсюда и название). Идеально подходит для лесозащитных полос с тополем, так как растёт в симбиозе с его корнями и хорошо плодоносит в безлесных регионах, включая посадки вдоль дорог и в парках.

естественный симбиоз - первичный механизм самоорганизации экосистемы. Мицелий структурирует гранулометрический состав, связывая его частицы, препятствуя ветровой эрозии, преобразуя бесплодные пески в субстрат, пригодный для жизни более

широкого круга растений.

Проведенное исследование показывает, что на смену унифицированным приемам озеленения советского образца с доминированием однолетних культур постепенно приходят более осмысленные

ландшафтные решения, ориентированные на многолетние засухоустойчивые породы и архитектурную выразительность. Однако сохраняющаяся засоленность грунтов, дефицит полива и засилье агрессивных старовозрастных деревьев требуют кардинальных мер, вследствие чего первоочередной задачей видится практическое возобновление проекта защитного «Зеленого кольца» с закладкой микоризного симбиоза для запуска почвообразующих процессов, А также реализация предложенной концепции

обновления площади им. Ленина г.Астрахани, нацеленной на стилистическое единство с кремлем. применение капельного орошения и подбор адаптированного к полупустынному климату высокодекоративного ассортимента, что в совокупности позволит не только нивелировать негативные природные воздействия, но и сформировать экологически устойчивую и визуально привлекательную городскую среду.

Список литературы

1. Белявцев А.В. Благоустройство города Астрахани в «Брежневскую эпоху» (1964-1982 гг.) // в сборнике: Астраханские Петровские чтения. Материалы VIII Международной научной конференции. Астрахань. 2024. С. 246-249.
2. Ванияев А.В. Информационные технологии при создании современных фонтанов // в книге: Новые информационные технологии в архитектуре и строительстве. Материалы VI Международной научно-практической конференции. Екатеринбург. 2023. С. 19.
3. Ванияев А.В. Проблемы дизайна в современном фонтаностроении России // в сборнике: Материалы международного научного форума «Образование. Наука. Культура» (21 декабря 2022 г.). В 6 ч. Ч. 1. Международная научно-практическая конференция «Искусствоведение и дизайн в современном дискурсе». Сборник научных статей. Гжель: ГГУ. 2022. С. 4-7.
4. Волков Д.С., Желонкина Е.Э., Безшлеева П.А., Федотов И.С., Хуторова А.О. Анализ экологического состояния территории для предпроектной работы по обустройству рекреационной зоны природного заповедника «Богдинско-Баскунчакский» // Московский экономический журнал. 2025. Т. 10. №5. С. 166-177.
5. Кособокова С.Р., Константинова Е.А. К вопросу о состоянии озеленения г. Астрахани и проблемах безопасности населения // Астраханский вестник экологического образования. 2022. №3(69). С. 113-118.

References

1. Belyavtsev A.V. *Blagoustroystvo goroda Astrakhani v «Brezhnevskuyu epokhu» (1964-1982 gg.)* [Improvement of the City of Astrakhan during the «Brezhnev Era» (1964-1982)]. In the collection: Astrakhan Peter the Great Readings. Proceedings of the VIII International Scientific Conference. Astrakhan. 2024. Pp. 246-249.
2. Vanyaev A.V. *Informatsionnyye tekhnologii pri sozdaniy sovremennykh fontanov* [Information technology in the creation of modern fountains]. In the book: New Information Technologies in Architecture and Construction. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference. Yekaterinburg. 2023. Pp. 19.
3. Vanyaev A.V. *Problemy dizayna v sovremennom fontanostroyenii Rossii* [Design issues in modern fountain construction in Russia]. In the collection: Proceedings of the International Scientific Forum «Education. Science. Culture» (December 21, 2022). In 6 parts. Part 1. International scientific and practical conference «Art Criticism and Design in Modern Discourse». Collection of scientific articles. Gzhel: GSU. 2022. Pp. 4-7.
4. Volkov D.S., Zhelonkina E.E., Bezshleeveva P.A., Fedotov I.S., Khutorova A.O. Analysis of the ecological state of the territory for pre-project work on the development of the recreational zone of the Bogdinsko-Baskunchaksky Nature Reserve. *Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal*. 2025. V. 10. No. 5. Pp. 166-177.
5. Kosobokova S.R., Konstantinova E.A. On the state of landscaping in Astrakhan and problems of public safety. *Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya*. 2022. No. 3(69). Pp. 113-118.

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Желонкина Елене Эдуардовна

кандидат географических наук, доцент, доцент
Государственного университета по землеустройству,
105064, Москва, Россия

Ванияев Алексей Витальевич

кандидат экономических наук, доцент, доцент
Государственного университета по землеустройству,
105064, Москва, Россия

Лунина Елизавета Дмитриевна

студент по направлению «Ландшафтная архитектура»
Государственного университета по землеустройству,
105064, Москва, Россия

Information about authors Affiliations

Zhelonkina Elena Eduardovna

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the State University of Land Use
Planning, 105064, Moscow, Russia

Vanyaev Alexey Vitalievich

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate
Professor of the State University of Land Use Planning, 105064,
Moscow, Russia

Lunina Elizaveta Dmitrievna

Student Majoring in Landscape Architecture at the State
University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 24.04.2026 г.

СТЕРЕОСИСТЕМА ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ДОКУМЕНТИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ

Мочалов А.В., Алтынов А.Е., Дрыга Д.О.

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»,
105064, Москва, Россия
e-mail: al.mochalov93@gmail.com

Цель работы заключается в разработке и экспериментальной проверке концепции двухкамерной стереосистемы с фиксированным базисом, предназначенной для оперативного 3D-документирования объектов археологического наследия фотограмметрическими методами. Предложена технологическая схема получения исходных данных, включающая синхронизацию двух видеопотоков по звуковому маркеру, извлечение одномоментных кадров и последующую обработку стереопар в цифровой фотограмметрической системе. Новизна подхода состоит в использовании конструктивно заданного базиса фотографирования как масштабной основы модели без обязательного применения наземной опорной сети. Рассмотрены вопросы выбора базиса, обеспечения перекрытия снимков, калибровки камер и оценки метрической точности. Экспериментальные результаты показали, что при съемке с частотой 60 кадр/с среднеквадратическая ошибка контрольных измерений составила 5.97 мм, а при 120 кадр/с снизилась до 2.01 мм, что подтверждает применимость системы для полевого археологического документирования.

Ключевые слова: стереосистема, наземная фотограмметрия, фиксированный базис, трехмерное моделирование, объекты археологического наследия, мультикамерная съемка, многоакурсное стерео.

STEREO SYSTEM FOR CREATING THREE-DIMENSIONAL MODELS TO DOCUMENT ARCHAEOLOGICAL HERITAGE OBJECTS

Mochalov A.V., Altynov A.Y., Dryga D.O.

Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

The study develops and experimentally evaluates a two-camera stereo system with a fixed baseline for rapid three-dimensional documentation of archaeological heritage objects. The proposed workflow combines sound-based synchronization of two video streams, extraction of simultaneous frames, and subsequent photogrammetric processing of stereo pairs. The main methodological feature is the use of the calibrated imaging baseline as the scale constraint for the photogrammetric model, which reduces dependence on ground control points or additional scale bars during field recording. The paper describes the selection of the working distance range, calculation of the baseline, overlap control, camera calibration, and accuracy assessment procedure. Experimental tests on a marked target showed that the root-mean-square error of control distance measurements was 5.97 mm at 60 fps and 2.01 mm at 120 fps. These results confirm the potential of the system for reproducible metric documentation in archaeological fieldwork.

Keywords: stereo system, terrestrial photogrammetry, fixed baseline, three-dimensional modeling, archaeological heritage objects, multi-camera imaging, multi-view stereo.

1. Введение

Наиболее массовыми разработками в области стереокамер в настоящее время являются решения, ориентированные на задачи компьютерного зрения и робототехники, такие как ZED 2i Stereo Camera [15] и Basler Stereo Cameras [7]. Эти системы используют две камеры, установленные на фиксированном базисе, и предназначены для определения пространственного положения объектов и навигации роботизированных систем.

Вместе с тем системы, функционирующие по аналогичному принципу, находят применение и в задачах построения измеримых трёхмерных моделей объектов. Такие решения представляют практический интерес, поскольку позволяют получать пространственные данные фотограмметрическими методами с использованием сравнительно доступного оборудования. Примерами являются системы, разработанные для мониторинга опасных объектов, в основе которых лежат конструкции из двух камер,

выполняющих одновременную съёмку объекта. За счёт фиксированного базиса фотографирования такие системы обеспечивают получение стереопар с известной геометрией и позволяют строить измеримые трёхмерные модели [10,13].

В российской практике также разработаны системы подобного типа. К ним относится ПАК АБИ «Каштан» [4], предназначенный для измерения объёма лесоматериалов, а также системы IntroVision [5], применяемые для сканирования и получения трёхмерных моделей. Эти примеры показывают, что подход, основанный на использовании стереосистем с фиксированным базисом, востребован не только в задачах машинного зрения, но и в прикладных инженерных технологиях.

В области полевых археологических работ подобные стереофотосистемы также представляют значительный интерес. Их применение особенно актуально при документировании объектов археологического наследия, для которых требуется

оперативная, воспроизводимая и метрически достоверная пространственная фиксация. В отличие от многих других объектов съёмки, археологический раскоп в процессе исследования последовательно изменяется и частично разрушается, поэтому возможность быстрого получения точной трёхмерной цифровой модели приобретает особую ценность. Использование стереосистем с фиксированным базисом позволяет уменьшить зависимость результата от опыта оператора, обеспечить наличие необходимого перекрытия в каждой паре изображений и повысить воспроизводимость геометрии съёмки.

Особенно проявляются преимущества таких систем при выполнении подводных археологических работ, где затруднены внешнее ориентирование, масштабирование и, как следствие, определение координат объекта. В этих условиях фиксированный базис стереосистемы может выступать как средство повышения устойчивости геометрии съёмки и получения высокоточных трёхмерных моделей даже при ограниченных возможностях координатной привязки снимков. Примерами подобных решений являются CRAB (Calibrated Rig for Aquatic photogrammetric Bicamera system) [14] и стереосистемы для подводной съёмки [12]. Все перечисленные решения основаны на принципах ближней стереофотограмметрии [1] и ориентированы на получение высокоточных трёхмерных моделей объектов съёмки. Внедрение таких стереосистем в практику археологических исследований может упростить и повысить качество процесса полевого документирования, снизить влияние человеческого фактора и обеспечить получение стереопар с заранее заданным и устойчивым перекрытием, достаточным для последующего фотограмметрического построения высокоточной трёхмерной модели.

Дополнительные перспективы для развития данного подхода связаны с использованием видеоданных. В полевой археологии стереовидеосъёмка представляет интерес как способ получения большого количества кадров, обладающих взаимным перекрытием. По сравнению с традиционной покадровой фотосъёмкой видеозапись позволяет ускорить документирование объекта, обеспечить избыточность наблюдений и упростить работу оператора в условиях ограниченного времени. Кроме того, извлечение кадров из видеоданных в лабораторных условиях даёт возможность отобрать наиболее удачные и информативные изображения, а при использовании двух синхронизированных фотокамер – сформировать последовательность стереопар для дальнейшей фотограмметрической обработки. Это особенно важно в археологии, где требуется быстро фиксировать изменяющееся состояние раскопа на разных этапах работ.

Анализ научной литературы и практики применения стереофотограмметрических методов

[1,12,13,14] показывает, что стереосистемы с фиксированным базисом могут быть очень востребованы при проведении полевых археологических исследований. Их использование в сочетании с видеосъёмкой открывает дополнительные возможности для более оперативного, воспроизводимого и технологически стандартизированного получения высокоточных трёхмерных моделей объектов археологического наследия.

2. Материалы и методы

2.1. Стереосистема

Концепция стереосистемы формировалась исходя из ключевых требований к её конструкции и режиму функционирования. К числу таких требований относились простота конструктивного исполнения и сборки, удобство эксплуатации в полевых условиях, обеспечение высокого качества видеоматериалов, возможность последующего построения трёхмерных моделей ОАН, а также возможность получения синхронных видео, для последующего извлечения стереопар.

В качестве цифровых фотокамер (ЦФК) для опытного образца предлагаемой стереосистемы были выбраны камеры GoPro Hero 11 Black (рис. 1), так как они имеют малые габариты и массу, ориентирована на видеосъёмку и позволяет выполнять запись с частотой до 120 кадр/с. Данная ЦФК обладает следующими характеристиками: фокусное расстояние объективов f_k – 2.71 мм, размер матрицы – 5568×4872 пикс., физический размер пикселя – 1.056мкм.



Рис. 1. ЦФК GoPro HERO11 Black

Так как конструкция является стереосистемой, то основной ее геометрической характеристикой является базис фотографирования, так как он оказывает непосредственное влияние на точность измерений по стереопаре изображений. Поэтому первоначально были определены требования к точности выполнения измерений объекта археологического наследия. Данное требование формируется из двух условий: пространственное разрешение – влияет на возможность дешифрирования элементов ОАН, а также геометрическая точность модели, характеризующаяся точностью выполнения измерений.

Согласно документам, регламентирующим проведение археологических работ [3,6], основным

рабочим масштабом составления документации по объектам археологического наследия является 1:50. В этом масштабе чертёж должен обеспечивать отображение элементов размером не менее 0.2 мм при точности измерений не хуже 0.3 мм, что в натуральных величинах соответствует объектам размером 10×10 мм и более и допустимой погрешности измерений по модели не более 15 мм.

Основной характеристикой, влияющей на то, какие объекты будут отображены на изображении является пространственное разрешение, которое зависит от характеристик ЦФК, а также расстояния фотографирования. Исходя из критериев Джонсона [11] следует, что для уверенной идентификации объекта необходимо, чтобы его характерная деталь была представлена не менее чем 10 пикселями изображения. Следовательно, необходимое пространственное разрешение съёмки должно составлять 1 мм/пикс для отображения объектов 10 на 10 мм и крупнее. Данное требование позволило определить рабочий диапазон расстояний фотографирования, при котором ближнее расстояние фотографирования равнялось минимальной дистанции фокусировки камеры, а дальнее расстояние — расстояние, с которого пространственное разрешение не превышает 1 мм. Исходя из технических характеристик камеры минимальная дистанция фокусировки является 0.5 м, а пространственное разрешение в 1 мм достигается с расстояния 2.5 м, определенного по формуле 1. Таким образом рабочий диапазон стереосистемы составил от 0.5 м до 2.5 м.

$$D = \frac{GSD \times f}{pxl} = \frac{1 \times 2,71}{0,00106} = 2556 \text{ мм} = 2,5 \text{ м} \quad (1)$$

После определения рабочего диапазона стереосистемы был рассчитан минимальный базис фотографирования для максимального расстояния фотографирования, обеспечивающий измерения по изображениям, с точностью 15 мм. В расчете использовалась формула для нормального случая съёмки, так как у предлагаемой стереосистемы связки проектирующих лучей параллельны, а главные оптические оси двух камер перпендикулярны (нормальны) относительно базиса фотографирования. Вычисленный по формуле 2 базис фотографирования составил 85 мм.

$$B = \frac{D^2 \times m_p}{m_z \times f} = \frac{2556^2 \times 0,000528}{15 \times 2.71} = 85 \text{ мм} \quad (2)$$

Также при расчете базиса фотографирования необходимо учитывать фактические перекрытия, так как обработка материалов планируется с использованием ЦФС, использующих в своей работе методы обработки SfM (Structure from Motion) и MVS (Multi-View Stereo). Поэтому в процессе съёмки необходимо учитывать требования разработчиков ЦФС, которые рекомендуют использовать перекрытие снимков не менее 80% [9]. Поэтому был выполнен расчет базиса фотографирования, при котором сохраняется перекрытие 80% для минимального расстояния фотографирования по формуле 3.

$$B = 2D_{min} \tan\left(\frac{FOV_x}{2}\right) \times \left(1 - \frac{P_x}{100}\right) = 2 \times 50 \times \tan\left(\frac{102}{2}\right) \times \left(1 - \frac{80}{100}\right) = 250 \text{ мм} \quad (3)$$

Вычисленный базис составил 250 мм, что превышает значение минимального базиса фотографирования (84 мм), определенного ранее. Также были выполнены расчеты влияния вновь определенного базиса фотографирования на погрешность определения глубины по стереопаре снимков для разных расстояний (с шагом 0.5 м) фотографирования по формуле 4, значения приведены в таблице 1.

$$m_z = \frac{D^2}{f_{pix} \times B} \times m_p \quad (4)$$

Как показывают расчёты, приведённые в таблице 1, при базисе фотографирования 250 мм на максимальном расстоянии съёмки достигается точность измерений 5.5 мм, что существенно превышает требования к допустимой погрешности, установленной на уровне 15 мм. При этом на расстоянии 2.5 м расчётное перекрытие изображений составляет 96%, то есть превышает принятое минимальное значение 80%. Вместе с тем при условии, что точность определения глубины по стереопаре предварительно оценена и удовлетворяет предъявляемым требованиям, столь высокое перекрытие следует рассматривать как допустимое, поскольку оно может положительно влиять на устойчивость

Таблица 1

Перекрытие снимков и погрешность определения глубины в зависимости от расстояния до объекта

FOV, °	D, мм	P, %	m _z , мм
102	0.5	80	0.22
	1.0	90	0.89
	1.5	93	2.00
	2.0	95	3.55
	2.5	96	5.54

сопоставления изображений и работу алгоритмов SfM/MVS [8].

В качестве основного способа синхронизации был выбран метод звуковых маркеров, поскольку он не требует внесения конструктивных изменений в систему и может быть реализован в штатных условиях съёмки. Подобный подход давно применяется в кинематографической практике, где для синхронизации аудио- и видеоматериалов используется хлопушка – нумератор [2], а сама синхронизация выполняется уже в камеральных условиях.

В результате был изготовлен опытный образец стереосистемы (рис. 2), в котором камеры жёстко фиксировались на алюминиевой штанге на расстоянии, соответствующем расчётному базису фотографирования. Для повышения удобства работы с системой конструкцией предусматривалась ручка, обеспечивавшая более устойчивое удержание и перемещение устройства в процессе съёмки. Принятая схема сборки позволяла сохранить постоянство взаимного положения камер и, следовательно, обеспечить стабильность геометрических параметров стереосистемы.

После сборки опытного образца выполнялась калибровка стереосистемы с использованием пространственного тест-объекта. В процессе калибровки были уточнены элементы внутреннего ориентирования каждой камеры, а также определено фактическое значение базиса фотографирования.



Рис. 2. Опытный образец стереосистемы в собранном виде

2.2. Алгоритм обработки видеопотока

Ключевой задачей при обработке видеоматериалов, полученных с помощью стереосистемы с фиксированным базисом, является обеспечение временной синхронизации записей с двух камер и последующее извлечение синхронных стереопар.

Однако реализация данного метода применительно к цифровому видеопотоку связана с рядом особенностей. Видео представляет собой не последовательность независимых изображений, а структуру, организованную в группы кадров (GOP), включающую ключевые кадры и предсказанные кадры. Вследствие этого временное положение отдельных изображений в потоке и возможность их точного

попарного сопоставления требуют дополнительного анализа. Иными словами, задача сводится не только к определению момента синхронизации двух видеозаписей, но и к корректному извлечению одномоментных кадров, пригодных для формирования стереопар. Структура одной секунды видеозаписи, полученной с камеры GoPro Hero 11 при частоте 120 кадр/с, приведена на рисунке 3.



Рис. 3. «Структура» секунды видео с камеры GoPro Hero 11

Для реализации процедуры синхронизации был разработан скрипт с использованием инструментов FFmpeg. Алгоритм обработки включал несколько последовательных этапов. На первом этапе в аудиодорожках левого и правого видеопотоков автоматически определялся звуковой маркер – хлопок, использовавшийся в качестве опорного события синхронизации. Момент звукового маркера определялся как положение максимума модуля аудиосигнала в заданном окне поиска:

$$n^* = \arg \max n \in [n_1, n_2] | x[n] |, \quad (5)$$

где $x[n]$ – дискретный аудиосигнал, $[n_1, n_2]$ – границы окна поиска, n^* – номер отсчёта, соответствующий моменту хлопка. Временная координата звукового маркера вычислялась по формуле:

$$t_{\text{хлоп}} = \frac{n^*}{f_s}, \quad (6)$$

где f_s – частота дискретизации аудиосигнала.

После определения момента хлопка для каждого видеопотока выполнялась обрезка записи таким образом, чтобы началом обоих видео соответствовал момент появления звукового маркера (рис. 4).

После выполнения временной синхронизации видеозаписей осуществлялось извлечение кадров, соответствующих левой и правой камерам, с формированием одномоментных стереопар. Данный этап является критически важным, поскольку временное рассогласование между извлекаемыми кадрами приводит к отклонению фактических геометрических условий съёмки от условий предварительной калибровки стереосистемы, при которых были определены взаимное положение камер и базис фотографирования. Для автоматизации этой процедуры был разработан скрипт, выполняющий выборку каждого N-го кадра из двух синхронизиро-

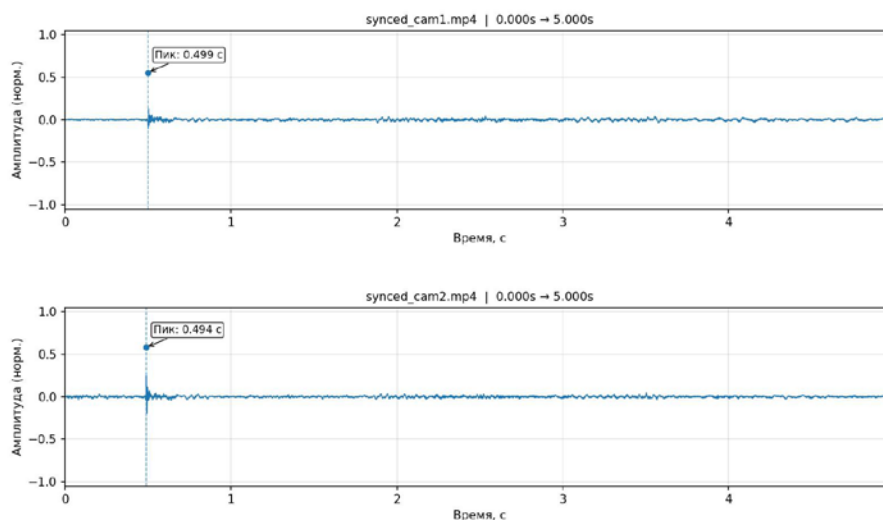


Рис. 4. Осциллограммы звукового сигнала после синхронизации видеопотоков (вверху – левая камера, внизу – правая камера)

ванных видеопотоков, начиная с момента звукового маркера. На вход программе подавались два видео-файла, соответствующие левой и правой камерам, шаг извлечения кадров N , а также параметры выходного формата изображений. Выборка кадров реализовывалась средствами FFmpeg с сохранением результатов в отдельные директории для каждой камеры и с согласованной сквозной нумерацией файлов, что обеспечивало однозначное соответствие левых и правых изображений в каждой стереопаре. Для последующей фотограмметрической обработки предпочтительным являлось сохранение кадров в формате PNG, поскольку используемое в нём сжатие без потерь не приводит к ухудшению изобразительных характеристик исходных данных.

2.3. Технология фотограмметрической обработки

Фотограмметрическая обработка данных, полученных с использованием стереосистемы с фиксированным базисом, может быть реализована в современных цифровых фотограмметрических системах, таких как Agisoft Metashape и аналогах, использующих алгоритмы SfM и MVS.

Технологическая схема включает подготовку проекта, импорт параметров калибровки камер, фототриангуляцию, масштабирование модели, уточнение параметров ориентирования, построение плотного облака точек, формирование полигональной модели и её текстурирование. Для изображений, извлечённых из видеопотока, обязательным условием является предварительный импорт параметров внутреннего ориентирования, так как такие кадры, как правило, не содержат полного набора метаданных, включающих элементы внутреннего ориентирования камеры.

Ключевой особенностью предлагаемой схемы является использование известного базиса фотографирования. В отличие от классического подхода, где масштаб задаётся по наземным опорным точкам или

масштабным линейкам на объекте, в данном случае масштаб может определяться через известное расстояние между центрами проекций левой и правой камер. В случае использования стереосистемы базис фотографирования является конструктивным элементом, определённым с высокой точностью, и может использоваться в процессе уравнивания, что позволяет определить масштаб трёхмерной модели без обязательного применения внешней геодезической привязки (рис. 5).

2.4. Методология оценки точности работы стереосистемы

Оценка точности работы стереосистемы определялась в рамках двух экспериментальных схем, различающихся способом фотограмметрической обработки, но основанных на единой тестовой базе. В качестве объекта контроля использовалась плоская тестовая мишень с нанесёнными 12-битными маркерами, обеспечивающими автоматическое и однозначное распознавание опорных точек на изображениях. Координаты маркеров в системе тест-объекта предварительно определялись электронным тахеометром, что позволяло рассматривать их как метрически достоверную основу для последующих расчётов. Видеосъёмка выполнялась в режимах 60 и 120 кадр/с, что обеспечивало возможность сопоставления влияния временной дискретизации видеопотока на корректность формирования стереопар. Перемещение стереосистемы относительно плоскости тест-объекта осуществлялось со скоростью порядка 0.5 м/с, соответствующей медленному темпу движения человека, при этом в процессе съёмки дополнительно задавались контролируемые изменения ориентации системы, имитирующие характерные наклоны камер при ручной полевой съёмке.

Для проверки корректности формирования синхронных стереопар из видеозаписей извлекались кадры, по которым выполнялся процесс фототриангуляции. По известным координатам маркеров

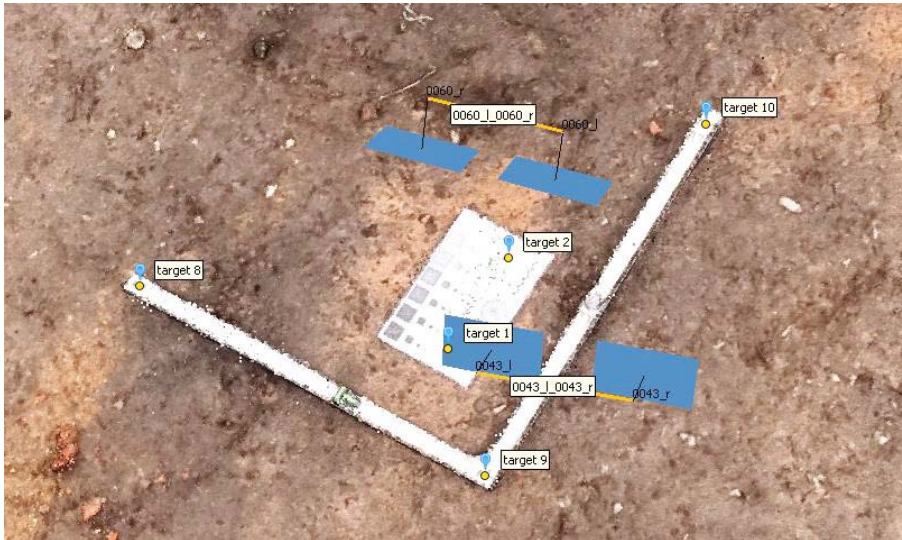


Рис. 5. Визуализация фрагмента уравненного блока фототриангуляции с заданными базами фотографирования для стереопар

тест-объекта определялись элементы внешнего ориентирования каждого снимка (рис. 6). На их основе вычислялись фактические значения базиса фотографирования для всех сформированных стереопар, а также среднеквадратические ошибки его определения. Поскольку базис фотографирования является конструктивно фиксированным параметром стереосистемы, отклонение восстановленного базиса от его номинального значения рассматривалось как интегральный показатель, характеризующий совместное влияние алгоритма синхронизации, режима частоты кадров и особенностей движения съёмочной системы на точность извлечения кадров. Для каждого режима формировался сопоставимый набор стереопар, что обеспечивало корректность сравнительного анализа.

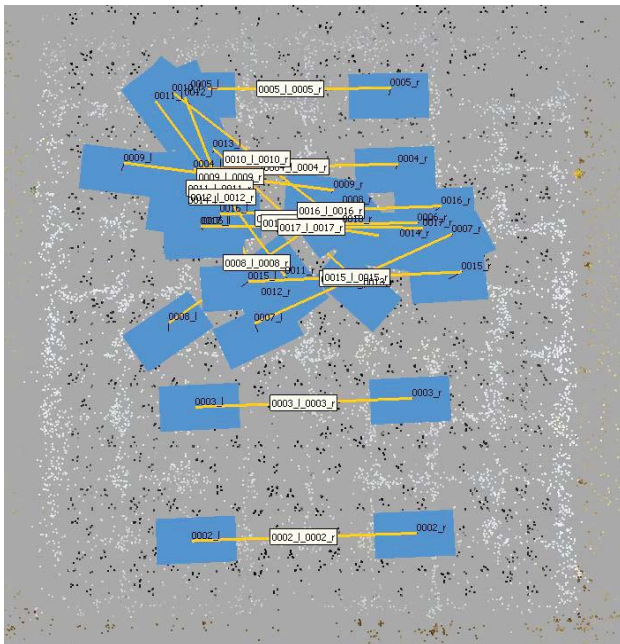


Рис. 6. Положение снимков после уравнивания блока и определения фактического базиса фотографирования

Оценка точности измерений, выполняемых по результатам съёмки с использованием стереосистемы, определялась в отдельном эксперименте, проведённом в сопоставимых условиях освещения, траектории и скорости съёмки. Принципиальное отличие состояло в том, что при уравнивании блока фототриангуляции масштаб модели задавался по известному значению базиса фотографирования. Тем самым проверялась возможность получения метрически корректной модели за счёт использования конструктивного параметра съёмочной системы как единственной масштабной меры. После масштабирования блока фототриангуляции на тест-объекте выбирались контрольные промеры между маркированными точками (рис. 7), эталонные значения которых вычислялись по их известным координатам

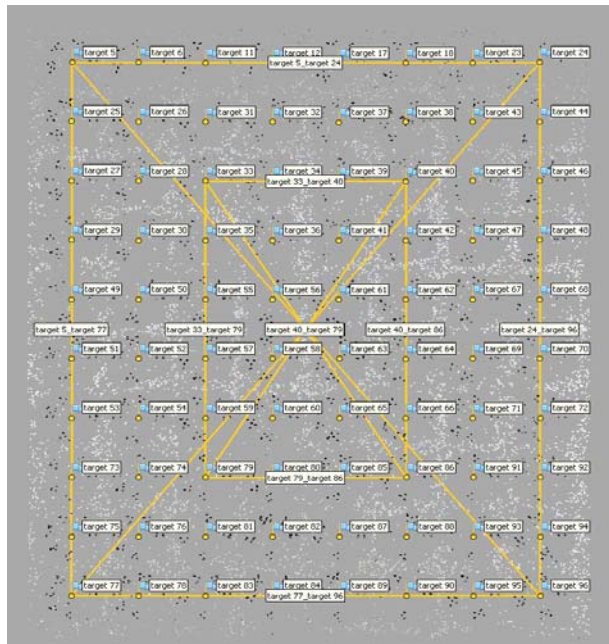


Рис. 7. Схема расположения контрольных промеров на тест-объекте

в системе тест-объекта. Соответствующие расстояния затем определялись по результатам уравнивания и сопоставлялись с эталонными значениями. В качестве количественных характеристик принимались среднеквадратические ошибки линейных измерений, а также относительная ошибка измерений.

Такая схема позволяет установить, с одной стороны, насколько корректно сохраняется базис фотографирования при формировании стереопар, а с другой – в какой степени построенная по нему модель пригодна для выполнения метрически достоверных измерений.

3. Результаты и обсуждение

По результатам экспериментальной оценки точности работы стереосистемы установлено, что при съёмке с частотой 60 кадр/с среднеквадратическая ошибка определения контрольных расстояний составила 5.97 мм, что соответствует относительной точности порядка 1/150. При увеличении частоты съёмки до 120 кадр/с среднеквадратическая ошибка снизилась до 2.01 мм, а относительная точность возросла до порядка 1/450. Полученные данные показывают, что увеличение частоты кадров положительно влияет на метрические характеристики модели за счёт более стабильного формирования одномоментных стереопар при движении съёмочной системы.

На основании экспериментальных данных и принятого критерия практической применимости, предусматривающего обеспечение измерений по модели с погрешностью не более 15 мм, выполнена оценка области применения системы. Установлено, что при частоте 30 кадр/с требуемая точность может быть обеспечена при работе с объектами площадью порядка 2.5×2.5 м, тогда как при частоте 120 кадр/с область применимости расширяется до объектов порядка 7×7 м при сохранении того же уровня точности. Это позволяет рассматривать частоту кадров

как один из ключевых факторов, определяющих как точность измерений, так и допустимый масштаб документируемого объекта.

Полученные результаты подтверждают работоспособность предложенной концепции стереосистемы с фиксированным базисом как средства создания трёхмерных моделей для документирования ОАН без обязательного использования наземной опорной сети. Вместе с тем полученные зависимости были установлены в контролируемых условиях эксперимента на плоском тест-объекте, поэтому дальнейшие исследования целесообразно связать с апробацией системы на реальных объектах археологической съёмки. Такая проверка позволит уточнить границы применимости метода в полевых условиях и оценить устойчивость технологии при съёмке объектов со сложной пространственной структурой.

Выводы

Предложенная стереосистема с фиксированным базисом может рассматриваться как перспективное средство создания измеримых трёхмерных моделей объектов археологического наследия фотограмметрическим методом. Принципиальная возможность использования базиса фотографирования в качестве масштабной основы подтверждает применимость такого подхода для упрощения полевой фиксации и снижения зависимости результата от дополнительных привязочных измерений.

Подобная стереосистема может расширить доступность метрически корректного 3D-документирования в археологии, особенно в условиях ограниченного времени полевых работ и недостаточной подготовки операторов в области фотограмметрии. Возможным следствием её применения может стать упрощение передачи исходных данных между исследовательскими группами и повышение воспроизводимости результатов камеральной обработки.

Список литературы

1. Ближняя фотограмметрия и 3D-зрение / Т. Луманн, С. Робсон, С. Кайл, Я. Бом; пер. с англ. Москва: URSS: ЛЕНАНД. 2018. 704 с.
2. Как использовать кинохлопушку? 25 правил [Электронный ресурс] // КиноСклад. 26.03.2021. URL: <https://kinosklad.ru/blog/kak-ispolzovat-kinohlopushku-25-pravil/> (дата обращения: 14.04.2026).
3. Положение о порядке проведения археологических полевых работ и составления научной отчётной документации [Электронный ресурс] // Институт археологии Российской академии наук. 2023. URL: https://archaeolog.ru/media/OPI/Polozhenie_2023_25012024.pdf (дата обращения: 18.02.2026).
4. Программно-аппаратный комплекс измерения объёмов круглых лесоматериалов «Каштан» [Электронный ресурс] // Анализатор.ру. URL: <https://www.analizator.ru/production/photogrammetry/kashtan/> (дата обращения: 10.03.2026).
5. Системы технического зрения, системы искусственного интеллекта и промышленная автоматизация [Электронный ресурс] // In Vitro Vision. URL: <https://invitrovision.ru/> (дата обращения: 15.03.2026).
6. Andrews D., Bedford J., Bryan P. Metric Survey Specifications for Cultural Heritage. 3rd ed. Swindon: Historic England. 2015. ISBN 978-1-84802-296-6.
7. Basler Stereo Camera [Электронный ресурс] // Basler. URL: <https://www.baslerweb.com/en/cameras/basler-stereo-camera/> (дата обращения: 10.03.2026).
8. Frey J., Kovach K., Stemmler S., Koch B. UAV Photogrammetry of Forests as a Vulnerable Process. A Sensitivity Analysis for a Structure from Motion RGB-Image Pipeline. Remote Sensing. 2018. Vol. 10. No. 6. Art. 912. DOI: 10.3390/rs10060912.
9. General image capture tips [Электронный ресурс] // Agisoft Helpdesk Portal. 2022. URL: <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000149337-general-image-capture-tips> (дата обращения: 09.05.2026).
10. Guccione D.E., Giacomini A., Thoeni K., Bahootoroddy F., Roncella R. A low-cost terrestrial stereo-pair photogrammetric monitoring system for highly hazardous areas. SSIM 2023: Third International Slope Stability in Mining Conference. ed. by P.M. Dight. Perth: Australian Centre for Geomechanics. 2023. Pp. 803-816. DOI: 10.36487/ACG_repo/2335_56.

11. Johnson's criteria [Электронный ресурс] // Wikipedia: The Free Encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Johnson%27s_criteria (дата обращения: 05.05.2026).
12. Mapping Pavlopetri: Robotic Underwater Archeology [Электронный ресурс] // DROP Lab. URL: <https://droplab.ri.cmu.edu/arch> (дата обращения: 27.04.2026).
13. Roncella R., Forlani G., Fornari M., Diotri F. Landslide monitoring by fixed-base terrestrial stereo-photogrammetry. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. II-5. Pp. 297-304. DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-297-2014.
14. Tanduo B., Borgogno E., Chiabrando F., Gallitto F., Manca S., Maschio P., Lingua A. Underwater Heritage documentation using photogrammetry: the CRAB system. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2025. Vol. XLVIII-2/W10-2025. P. 295–302. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W10-2025-295-2025.
15. ZED 2i [Электронный ресурс] // Stereolabs. URL: <https://www.stereolabs.com/en-br/store/products/zed-2i> (дата обращения: 10.03.2026).

References

1. Lumann T., Robson S., Kyle S., Boehm J. *Blizhnyaya fotogrammetriya i 3D-zreniye* [Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging]. Moscow: URSS, LENAND. 2018. 704 p.
2. *Kak ispol'zovat' kinokhlopushku? 25 pravil* [How to Use a Film Clapperboard? 25 Rules]. KinoSklad. 26.03.2021. URL: <https://kinosklad.ru/blog/kak-ispolzovat-kinokhlopushku-25-pravil/> (accessed: 14.04.2026).
3. *Polozheniye o poryadke provedeniya arkhologicheskikh polevykh rabot i sostavleniya nauchnoy otchetnoy dokumentatsii* [Regulations on Archaeological Fieldwork and Scientific Reporting Documentation]. Institute of Archaeology of the Russian Academy of Sciences. 2023. URL: https://archaeolog.ru/media/OPI/Polozhenie_2023_25012024.pdf (accessed: 18.02.2026).
4. Hardware and Software System for Measuring Round Timber Volume «Kashtan». Analizator.ru. URL: <https://www.analizator.ru/production/photogrammetry/kashtan/> (accessed: 10.03.2026).
5. Machine Vision Systems, Artificial Intelligence Systems and Industrial Automation. In Vitro Vision. URL: <https://invitrovision.ru/> (accessed: 15.03.2026).
6. Andrews D., Bedford J., Bryan P. Metric Survey Specifications for Cultural Heritage. 3rd ed. Swindon: Historic England. 2015. ISBN 978-1-84802-296-6.
7. Basler Stereo Camera. Basler. URL: <https://www.baslerweb.com/en/cameras/basler-stereo-camera/> (accessed: 10.03.2026).
8. Frey J., Kovach K., Stemmler S., Koch B. UAV Photogrammetry of Forests as a Vulnerable Process. A Sensitivity Analysis for a Structure from Motion RGB-Image Pipeline. Remote Sensing. 2018. Vol. 10. No. 6. Art. 912. DOI: 10.3390/rs10060912.
9. General image capture tips. Agisoft Helpdesk Portal. 2022. URL: <https://agisoft.freshdesk.com/support/solutions/articles/31000149337-general-image-capture-tips> (accessed: 09.05.2026).
10. Guccione D.E., Giacomini A., Thoeni K., Bahootoroodi F., Roncella R. A low-cost terrestrial stereo-pair photogrammetric monitoring system for highly hazardous areas. SSIM 2023: Third International Slope Stability in Mining Conference. ed. by P.M. Dight. Perth: Australian Centre for Geomechanics. 2023. Pp. 803-816. DOI: 10.36487/ACG_repo/2335_56.
11. Johnson's criteria. Wikipedia: The Free Encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Johnson%27s_criteria (accessed: 05.05.2026).
12. Mapping Pavlopetri: Robotic Underwater Archeology. DROP Lab. URL: <https://droplab.ri.cmu.edu/arch> (accessed: 27.04.2026).
13. Roncella R., Forlani G., Fornari M., Diotri F. Landslide monitoring by fixed-base terrestrial stereo-photogrammetry. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2014. Vol. II-5. Pp. 297-304. DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-297-2014.
14. Tanduo B., Borgogno E., Chiabrando F., Gallitto F., Manca S., Maschio P., Lingua A. Underwater Heritage documentation using photogrammetry: the CRAB system. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2025. Vol. XLVIII-2/W10-2025. P. 295–302. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W10-2025-295-2025.
15. ZED 2i. Stereolabs. URL: <https://www.stereolabs.com/en-br/store/products/zed-2i> (accessed: 10.03.2026).

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Мочалов Александр Валерьевич

старший преподаватель кафедры аэрокосмических съемок, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», 105064, Москва, Россия

Алтынов Александр Ефимович

кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических съемок, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», 105064, Москва, Россия

Дрыга Данила Олегович

кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических съемок, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии», 105064, Москва, Россия

Information about authors Affiliations

Mochalov Aleksandr Valeryevich

Senior Lecturer, Department of Aerospace Surveying, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Altynov Aleksandr Yefimovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Aerospace Surveying, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Dryga Danila Olegovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Aerospace Surveying, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 22.05.2026 г.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ И АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ФОРМИРОВАНИЯ БАНКА ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ДЛЯ ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА И КАДАСТРОВ

Кузовлев Н.А., Юнусов А.Г.

ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству», 105064, Москва, Россия

e-mail: nik.kuzovlev.2018@mail.ru

Исследование проведено в рамках разработки методики формирования банка геопространственных данных геодезического обоснования землеустройства и кадастров на основе интеграции пунктов градостроительной и кадастровой деятельности (ГКД) в государственные фонды пространственных данных. В работе выполнен анализ состояния существующих геодезических сетей и тенденций их развития, разработана технологическая схема формирования базы данных пунктов ГКД и создано специализированное программное обеспечение. Предложены алгоритмы использования такого обоснования при выполнении кадастровых работ. Проведена апробация методики на примере Истринского городского округа и выполнен расчет экономической эффективности её реализации.

Основные результаты исследования демонстрируют возможность значительного увеличения плотности геодезической опоры за счет использования уже созданных при строительстве пунктов ГКД. Также доказана высокая экономическая эффективность реализации методики.

Ключевые слова: пункты градостроительной и кадастровой деятельности, геодезическое разбивочное обоснование, государственная геодезическая сеть, кадастр, федеральный фонд пространственных данных.

SOME ASPECTS AND APPROVAL OF THE METHODOLOGY FOR FORMING A GEOGRAPHICAL DATA BANK FOR LAND MANAGEMENT AND CADASTRE

Kuzovlev N.A., Yunusov A.G.

State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

The study was conducted as part of the development of a methodology for creating a geospatial data bank for geodetic support of land management and cadastral activities based on the integration of urban planning and cadastral activities (UPCA) into state spatial data funds. The study analyzed the state of existing geodetic networks and their development trends, developed a process flow for creating a database of UPCA activities, and created specialized software. The study proposed algorithms for using this support in cadastral activities. The study tested the methodology using the example of the Istra City District and calculated the economic efficiency of its implementation.

The main results of the study demonstrate the possibility of significantly increasing the density of geodetic support by using the GCD points already created during construction. The high economic efficiency of the methodology has also been proven.

Keywords: urban planning and cadastral activities, geodetic surveying, state geodetic network, cadastre, and federal spatial data fund.

Введение

Вынос границ земельного участка в натуру или координирование поворотных точек объекта капитального строительства (ОКС) для дальнейшей его постановки на государственный кадастровый учет, преимущественно выполняется методом RTK (real time kinematic) глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), что обуславливается минимальными трудовыми затратами. В случае необходимости получения повышенной точности, например, при координировании уникальных зданий и сооружений в условиях плотной городской застройки, предпочтительно съёмочное обоснование создавать методом спутниковых статических наблюдений, а съёмку с него производить тахеометром классическими методами наземной геодезии.

С начала февраля 2022 года из-за проведения специальной военной операции на всей территории Российской Федерации фиксируется подавление

спутникового сигнала. Особенно интенсивно блокируется сигнал ГНСС в Центральном и Южном федеральных округах страны. Невозможность применения ГНСС вынуждает выполнять значительную часть геодезических работ при кадастре, землеустройстве и мониторинге земель исключительно классическими наземными методами. Для эффективного проложения полигонометрических и теодолитных ходов требуется высокая плотность геодезической сети в районе работ.

В то же время при возведении крупных объектов дорожного строительства за счет средств государственного бюджета создаются несколько взаимосвязанных геодезических сетей различной точности. На этапе проектных работ проводятся инженерно-геодезические изыскания, в ходе которых создается опорная геодезическая сеть (ОГС), позже включаемая в сеть геодезического разбивочного обоснования (ГРО). Далее на этапе строительства создается

строительная каркасная сеть (КС) и опирающиеся на нее сети ГРО и мостового ГРО (МГРО).

Предложено общее наименование для таких пунктов – пункты ГКД – геодезические пункты для ведения градостроительной и кадастровой деятельности. Пункты ГКД включают в себя пункты постоянного закрепления. При наличии регламента их интеграции в государственные фонды пространственных данных (Государственный фонд данных землеустройства (ГФДЗ), Федеральный фонд пространственных данных (ФФПД)), такие пункты могут быть использованы в землеустройстве и кадастровой деятельности страны, решая проблему недостаточной плотности геодезических сетей РФ. Низкие трудовые и финансовые затраты обуславливаются тем, что на закладку и определение координат пунктов ГКД уже потрачены государственные средства в ходе строительства объектов транспортной, социальной и производственной инфраструктуры.

Аналитический обзор состояния и вектора развития геодезических сетей в России и за рубежом

По результатам актуальных исследований ученых из разных регионов России государственная геодезическая сеть существенно прорежена [1], в регионах количество ее пунктов значительно ниже установленных стандартов. Например, в Алагирском районе республики Северная Осетия с площадью 2000 км² действующими являются только 13 пунктов ГГС (0.006 шт. на 1 км²) [2,3]. В Вытегорском районе Вологодской области из 293 деревень в 187 отсутствуют пункты опорной межевой сети, в связи с чем в деревнях района отмежевано в среднем менее 10% земель [4].

На данный момент, для выполнения кадастровых работ и землеустройства нормативно допуска-

ется использование пунктов ГГС, городских ОГС и сетей дифференциальных геодезических станций (ДГС). В августе 2023 года опубликован Федеральный закон № 491-ФЗ, закрепляющий создание, функционирование и развитие федеральной сети ДГС (ФСГС) – совокупности объединенных ДГС, на которых производится прием сигналов спутниковых систем и передача полученной информации в государственную информационную систему.

Закономерным развитием ГНСС в РФ считаются не только тенденции к объединению базовых станций (БС) в ДГС, но и дальнейшее определение координат всех таковых носителей поправок с их дальнейшим уравниванием в общеземную систему координат (СК) [5]. На основании активности по зарубежным публикациям выявлены аналогичные тенденции в развитии именно референцных БС в качестве координатной основы для проведения как кадастровых, так и изыскательских работ. Тенденции при создании геодезической основы, как среди отечественных, так и среди зарубежных ученых, заданы широким изучением, развитием и внедрением ГНСС технологий в производство [6,7]. В связи с этим фактическая плотность ранее созданных геодезических пунктов стремительно снижается.

На основании анализа нормативно-технических и правовых документов, регламентирующих требования к созданию и плотности геодезических сетей РФ, разработан график хронологии развития отечественных геодезических сетей в период с 1983 по настоящее время (рис. 1).

Тенденции развития геодезических сетей были заданы, прежде всего, возможностями применения и степенью распространения спутникового оборудования на конкретный период. На основании графика (рис. 1), можно выделить три этапа модернизации геодезических сетей:



Рис. 1. График изменений требований к плотности геодезической основы РФ

– с 1983 по 2002 г. отмечена высокая плотность пунктов ГГС 1-4 классов, ГСС 1-2 разрядов и ОМС (до 16 пунктов на 1 км²), пригодная для традиционных методов наземной геодезии;

– с 2002 по 2012 г. нормативно предписан переход на ГНСС-технологии с частичным сохранением ОМС;

– с 2012 по 2025 г. наблюдается преобладание пунктов спутниковых сетей над пунктами геодезических сетей сгущения (ГСС).

Таким образом в условиях отсутствия возможности работы ГНСС-оборудованием сохраняется потребность в плотной наземной сети (для межевания, топосъемки масштаба 1:500 – 1:2000), однако нормативная плотность таких сетей в период с 1983 по 2025 год была существенно снижена. В связи с этим рассмотрены возможные варианты способов создания геодезического обоснования при выполнении кадастровых работ [8]. Выявлен неиспользованный резерв: пункты ГРО, создаваемые за счет средств государственного бюджета. Также установлено, что сведения о создании таких пунктов не предоставляются в государственные фонды пространственных данных, в связи с чем законодательно их использование при выполнении кадастровых работ невозможно. Это обуславливает необходимость разработки методики формирования банка геопространственных данных геодезического обоснования для землеустройства и кадастров.

Формирование банка геопространственных данных геодезического обоснования для землеустройства и кадастров

Согласно СП126.13330.2017 сети ГРО создаются в соответствии с ТЗ, регламентирующим все необходимые технические требования к закладке центров и реперов. Как правило, координаты пунктов определяют с точностью не хуже 1 разряда в плане в местной системе координат региона, а высоты – IV

класса по высоте в Балтийской системе высот.

По своей конструкции репера и центры пунктов ГРО постоянного закрепления соответствуют пунктам типа 3 (центр пункта ГГС сети 1-4 класса), типа 147 (центр пункта ГГС 1-4 класса свайный), типа 158 (центр пункта ГСС 4 класса полигонометрии или 1-2 разряда триангуляции, трилатерации, полигонометрии), типа 160 (центр пункта ГГС 1-4 класса), типа 161 (фундаментальный репер) и типа 162 (центр пункта ГГС 1-4 классов и грунтовый репер высотной сети I-IV классов) [9]. Таким образом, точность определения планово-высотного положения пунктов ГКД и конструкция их центров и реперов на момент ввода строительного объекта в эксплуатацию позволяют считать такие пункты пригодными для использования в кадастровых работах, землеустройстве и мониторинге земель.

Все сведения о заложенных пунктах хранятся в виде технического отчета у застройщика, являющегося техническим заказчиком. В ситуации с госзаказом техническим заказчиком является подрядная организация, выигравшая тендер на строительство или реконструкцию объектов городской инфраструктуры согласно 44-ФЗ.

Жизненный цикл пунктов ГКД завершается одновременно с окончанием строительства – вводом объекта в эксплуатацию. Сведения о сохранившихся пунктах ГКД передаются во внутреннюю геоинформационную систему (ГИС) заказчика и, в дальнейшем, становятся недоступными для «общественного пользования». В связи с этим возникает необходимость решения вопроса формирования базы данных (БД) ГИС различных заказчиков для передачи сведений о пунктах ГКД в государственные фонды пространственных данных. Разработана технологическая схема формирования БД пунктов ГКД заказчика (рис. 2).

Разработанная структура формирования БД

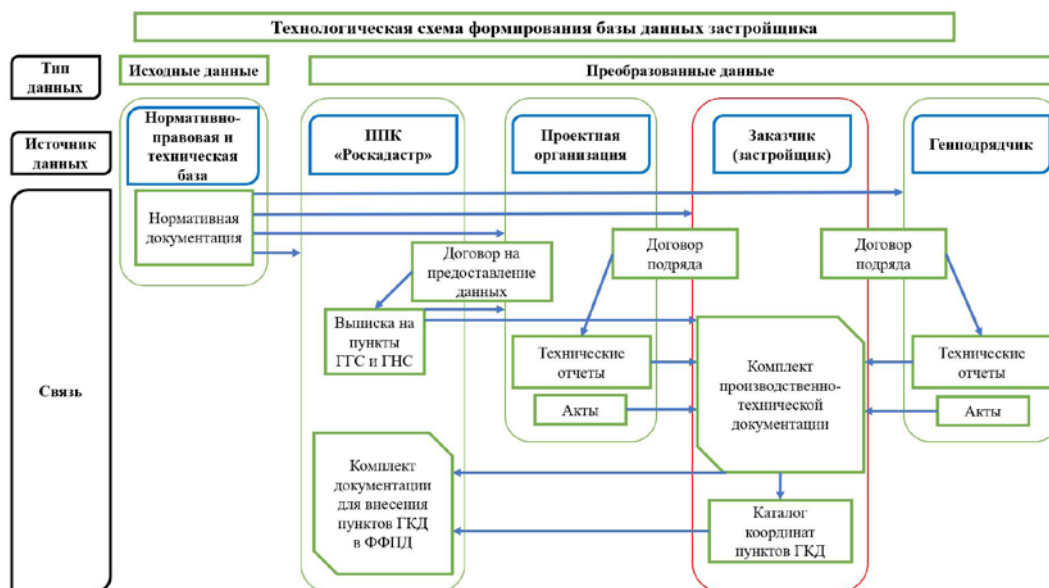


Рис. 2. Технологическая схема формирования БД застройщика

необходима для внедрения в ГИС заказчика (застройщика) с целью решения ряда следующих технических задач:

- организация оперативного и систематизированного доступа к информации о местах расположения, характеристиках и состояниях пунктов ГГС и ГКД на объекте;
- проведение контроля за состоянием пунктов ГКД;
- эффективное взаимодействие с остальными участниками строительного процесса;
- возможность оперативной передачи пунктов ГКД и сведений о них от застройщика к ППК «Роскадастр» с целью дальнейшего внесения информации о пунктах в реестры государственных фондов пространственных данных.

На языке программирования Python разработано специализированное ПО «Управление пунктами ГКД» [10], являющееся компьютерной реализацией раздела БД заказчика для сбора, редактирования и хранения сведений о пунктах ГКД. Программный продукт имеет две основных вкладки – «Документация» и «Данные о пунктах». Во вкладке «Документация» пользователь может вносить, редактировать и экспортировать все необходимые сведения об использованных в ходе проведения строительных работ документах (НТД, формах, выписках на пункты, договорах, отчетах, актах и каталогах координат и т.п.), также импортировать в БД сам файл с документом. На вкладке «Данные о пунктах» реализована возможность как ручного ввода, так и автоматизированного импорта и экспорта в заданном формате сведений о пунктах ГКД (наименования и типа, класса точности определения координат и высот, информации об источнике сведений о пункте и т.п.). Каждый пункт связан с конкретным документом (ТО, актом, каталогом или выпиской) из вкладки «Документация» (рис. 3).

Программа отличается простотой освоения и

универсальностью, так как может быть использована всеми участниками инвестиционно-строительного процесса не только при реализации методики формирования банка геопространственных данных геодезического обоснования, но и при решении любых задач кадастра, геодезии и землеустройства с использованием геодезических пунктов.

Применение пунктов ГКД в кадастровой деятельности

Сети пунктов ГКД характеризуются более высокой плотностью в сравнении с существующей ГГС. Это обуславливает специфику и ряд преимуществ их применения при выполнении кадастровых работ. Составлена схема с рекомендуемыми алгоритмами использования пунктов ГКД при определении координат поворотных точек ОКС и ЗУ геодезическим, спутниковым и фотограмметрическим методами (рис. 4).

На данный момент представлено следующее видение использования пунктов ГКД в кадастровой деятельности:

– геодезический метод:

а) при подготовке технического плана на ОКС возможно использование проектной документации, которая, может служить основой и для трехмерного кадастра [11]. Однако, как правило, вся исполнительная документация ведется в локальной системе координат и высот, что обуславливает необходимость расчета ключей перехода СК объекта и МСК. Такие ключи предлагается рассчитывать по координатам и высотам пунктов ГКД, от которых был построен объект, планируемый к постановке на учет в трехмерном формате;

б) плотная геодезическая сеть позволит сократить длину ходов полигонометрии для создания съемочного обоснования. Такая возможность будет актуальна для всех видов кадастровых работ в условиях отсутствия спутникового сигнала.

– спутниковый метод:

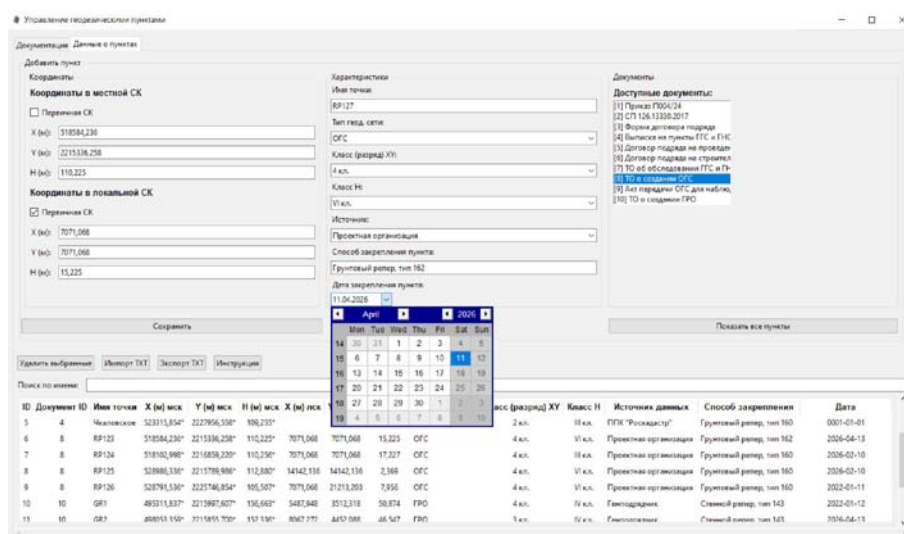


Рис. 3. Интерфейс разработанного программного обеспечения



Рис. 4. Схема использования пунктов ГKD при выполнении кадастровых работ

а) спутниковые наблюдения минимум на 4 пунктах вблизи объекта кадастровых работ позволят определить параметры локализации для плановых координат на территорию съемки. Точные плановые спутниковые наблюдения будут актуальны как для кадастрового учета отдельных ОКС и ЗУ, так и для проведения комплексных кадастровых работ;

б) спутниковые наблюдения на 5 и более пунктах позволят вычислить параметры локализации для координат и высот, что рекомендуется к применению в 3D-кадастре;

в) при спутниковых наблюдениях в режиме RTK в качестве пунктов ДГС следует использовать исключительно пункты ФСГС. Для проверки достоверности полученных поправок и, как следствие, вычисленных координат, рекомендуется производить дополнительные измерения на геодезических пунктах, расположенных в непосредственной близости от координируемого объекта.

– фотограмметрический метод:

а) пункты ГKD, представленные грунтовыми реперами и центрами, как правило, окапывают и ограждают деревянной или металлической конструкцией. Такое обустройство пунктов позволяет однозначно их идентифицировать в качестве опорных точек на снимках;

б) при проведении аэрофотосъемки элементы внешнего ориентирования снимков возможно определять спутниковым методом в режиме RTK. Для этого необходимо получение поправок от базовой станции, которая может быть установлена на пункте ГKD с известными координатами и высотой.

Таким образом, на основании специфики сетей пунктов ГKD разработаны общие рекомендации по использованию данного вида геодезической основы для решения задач кадастра методами геодезии и аэрофотосъемки.

Анализ существующих геодезических сетей на исследуемом объекте

Апробация методики проведена на территории Истринского городского округа Московской области. Для подтверждения актуальности исследования проведен анализ состояния пунктов геодезических сетей. Доказано, что «на территории Истринского городского округа наблюдается уменьшение плотности пунктов геодезических сетей, созданных классическими наземными методами» [8]. Согласно результатам исследования, статус «Действующий» имеют всего 27 пунктов ГГС при общей площади Истринского городского округа – 1299 км². В связи с этим плотность геодезических пунктов приходится 1 шт. на 48 км², что составляет 0.02 шт. на 1 км². при нормативно регламентированных от 1 шт. на 1 км² для незастроенных территорий и до 16 шт. на 1 км² для плотно-застроенных городских территорий. Таким образом, разреженность геодезической сети превышает нормативные значения в 5 раз для незастроенных территорий и почти в 50 раз для застроенных территорий.

Для обоснования необходимости увеличения плотности геодезической сети на исследуемой территории помимо полевого обследования геодезических центров, марок и знаков пунктов выполнен анализ доступности пунктов ФСГС. В рамках исследования проведен анализ состояния 40 пунктов федеральной сети ДГС, расположенных как в самом Истринском городском округе, так и в зоне 30 километров от его границы. Для анализа доступности станций ФСГС выбран период с 1 января 2024 года по 31 декабря 2025 года включительно. С помощью карточек пунктов выявлены конкретные дни глушения спутникового сигнала пунктов сети [12]. И составлена общая таблица активности пунктов сети (табл. 1) и схема расположения пунктов ФСГС (рис. 5).

Для удобства анализа исследуемая территория

Таблица 1

Средняя стабильность спутникового сигнала на исследуемых пунктах ФСГС по месяцам за 2024-2025 гг.

Месяц	Общая средняя стабильность сети, %	
	2024 год	2025 год
Январь	18	51
Февраль	24	54
Март	33	61
Апрель	28	71
Май	47	58
Июнь	30	54
Июль	24	61
Август	46	66
Сентябрь	53	65
Октябрь	32	51
Ноябрь	51	44
Декабрь	50	46
Среднее	36	57
	49	

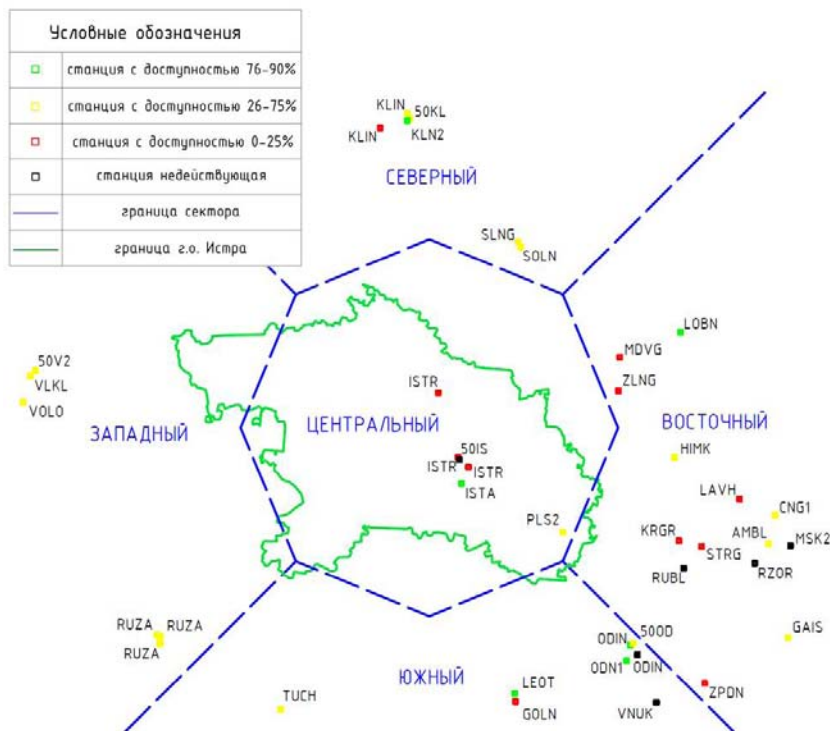


Рис. 5. Карта-схема расположения пунктов ФСГС в Истринском городском округе и прилегающей территории

распределена на 5 секторов – Центральный, Северный, Южный, Западный и Восточный, содержащих 5, 6, 6, 6 и 11 пунктов ДГС соответственно. Следует отметить, что среднегодовой уровень стабильности ГНСС-сигнала ни для одной базовой станции не превышал 90 % на протяжении всего исследуемого периода. Средняя стабильность сигнала на всех исследуемых станциях ФСГС за два года составила 49 % (рис. 6). Глушение сигнала ГНСС во времени носит систематический характер.

Для успешного выполнения кадастровых и землеустроительных работ спутниковым оборудованием необходимо не только наличие стабильно работающей станции ФСГС в зоне доступности, но и отсутствие средств глушения непосредствен-

но рядом с объектом кадастровых работ. Результаты анализа сводной таблицы 1, схемы ФСГС (рис. 5) и графика стабильности спутниковой сети (рис. 6) однозначно позволяют сделать вывод о невозможности стабильного проведения геодезических работ на исследуемой территории исключительно спутниковыми методами.

Апробация методики формирования банка геопространственных данных геодезического обоснования для землеустройства и кадастров

Поскольку пункты ГКД закладываются близ объектов строительства, то для выявления потенциальных мест расположения пунктов необходимо смоделировать расположение строящихся объектов в городском округе Истра. Одним из основных



Рис. 6. Общий график стабильности приема сигналов спутниковой сети

документов, отображающих планируемые работы по строительству и реконструкции объектов инфраструктуры городского округа, является генеральный план (ГП). Транспортная инфраструктура городского округа Истра, согласно ГП, представлена объектами автомобильного, железнодорожного, трубопроводного, воздушного и водного видов транспорта.

Нормативным документом, регламентирующим создание геодезических сетей при автодорож-

ном строительстве, является ГОСТР 59865-2022. На основании ГОСТа составлена таблица 2, на которой отображены основные требования к размещению геодезических пунктов для объектов автодорожного строительства.

В соответствии с таблицей 2 и на основании ГП разработана схема размещения пунктов ОГС, КС, ГРО и МГРО на территории Истринского городского округа (рис. 7).

Схема демонстрирует высокую плотность

Таблица 2

Нормативные требования к плотности размещения пунктов ГКД

Тип пункта	Регламентирование в ГОСТ Р 59865 - 2022	Плотность размещения
ОГС	п.п. 6.3	парами в начале и в конце объекта, также не реже чем через 1 км
КС	табл. 2	парами в начале и в конце объекта, также каждые 5-8 км парами в зависимости от протяженности трассы и при протяженности трасс свыше 100 км по согласованию с заказчиком
ГРО	табл. 4	каждые 200-350 м в зависимости от рельефа местности
МГРО	табл. 6	от 4 до 16 пунктов в зависимости от площади застройки и для внеклассных мостов по согласованию с проектной организацией

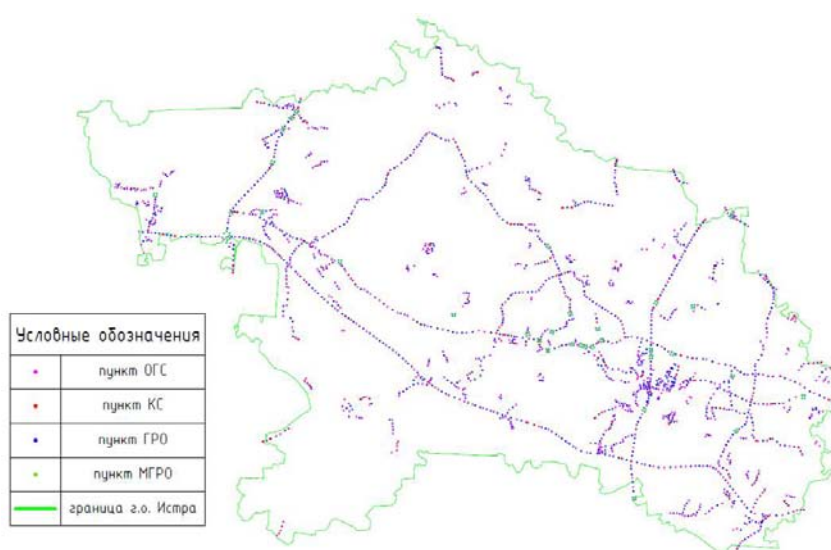


Рис. 7. Схема-проект размещения пунктов разбивочного обоснования

пунктов КГД при строительстве (стр.) и реконструкции (рек.) объектов транспортной инфраструктуры, равномерно распределенных по всей территории Истринского городского округа. На основании схемы размещения пунктов ГКД (рис. 7) и нормативных требований (табл. 2) составлена сводная таблица 3. Анализ таблицы позволяет отметить значительный количественный прирост в плотности пунктов геодезических сетей на исследуемой территории.

Анализ схемы размещения пунктов ГКД (рис. 7) и таблицы 3 дает основания утверждать, что за счет пунктов ГРО, закладываемых при строительстве и реконструкции объектов транспортной инфраструктуры возможно значительное увеличение плотности пунктов геодезической сети. Согласно проекту, в Истринском городском округе за счет строительства объектов транспортной инфраструктуры порядка 2032 геодезических пунктов потенциально могут быть вовлечены в кадастровую и землеустроительную деятельность. В сравнении с имеющимися, на данный момент, 27 «действующими» пунктами [6], интеграция в кадастр даже малой части из запроектированных к строительству пунктов ГКД сведет к минимуму, или полностью искоренит проблему низкой плотности пунктов ГГС на исследуемой территории.

Так, при введении в общедоступное использование всех запроектированных к закладке пунктов ГКД, общая плотность пунктов вырастет в 75 раз (1.5 пункта на 1 км²). Количество пунктов, уже заложенных за государственные деньги, превысит в полтора раза нормативно регламентированное количество для застроенных территорий (1299 пунктов) и в 16 раз для незастроенных территорий (130 пунктов). На данный момент, столь высокая плотность геодезических пунктов для успешного выполнения задач кадастра и землеустройства района не требуется, поэтому положения концепции интеграции пунктов ГКД в кадастровую деятельность предусматривают возможность выборочного внесения сведений о конкретных пунктах в государственные фонды пространственных данных.

Оценка экономической эффективности формирования банка геопространственных данных пунктов ГКД

Выгодой создания банка данных пунктов ГКД

для государства является отсутствие дополнительных затрат на увеличение плотности геодезической сети городского округа за счет создания новых пунктов ППК «Роскадастр» – пункты ГКД создаются заказчиком в рамках реализации строительства и реконструкции по 44-ФЗ за счет средств федерального бюджета. Это позволит произвести повторную реализацию средств государственного бюджета, выделенных на строительство и реконструкцию, открывая возможность дальнейшей эксплуатации пунктов ГКД. Экономический расчет сметной стоимости закладки и наблюдения пунктов ГКД позволит произвести оценку затраченных средств государственного бюджета, пригодных для решения широкого спектра задач кадастра и землеустройства в Истринском городском округе без дополнительных вложений.

Стоимость закладки пунктов (табл. 4) рассчитана в соответствии с расценками и коэффициентами, приведенными в приказе Минстроя на нормативные затраты на работы по инженерно-геодезическим изысканиям (НЗ). Как правило, при выполнении коммерческих заказов актуальна рыночная стоимость услуг, а при реализации государственных объектов смета рассчитывается именно по справочникам базовых цен или НЗ с учетом актуальных коэффициентов приведения цен к уровню на текущий период.

Согласно результатам сметного расчета (табл. 4), итоговая стоимость создания сетей пунктов ГКД на исследуемой территории составит 260.4 млн. руб., а средняя, стоимость создания 1 пункта по НЗ составит порядка 128 тыс. руб.

Выводы

В работе предложено решение актуальной научно-практической задачи по разработке методики формирования банка геопространственных данных геодезического обоснования для землеустройства и кадастров, что имеет существенное значение для обеспечения устойчивого развития территорий в условиях ограничения использования спутниковых технологий.

На основании выполненных исследований сделаны следующие выводы:

– проведен ретроспективный анализ нормативно-технической базы (1983 – 2024 гг.), в ходе

Таблица 3

Количество создаваемых пунктов разбивочного обоснования

Сеть	Федеральные		Сумм.	Региональные		Сумм.	Местные		Сумм.	Итого
	Стр.	Рек.		Стр.	Рек.		Стр.	Рек.		
ОГС	24	84	108	121	222	343	141	254	395	846
КС	10	22	32	42	44	86	20	30	50	168
ГРО	35	131	166	130	260	390	99	226	325	881
МГРО	41	–	41	68	12	80	16	–	16	137
Итого	110	237	347	361	538	899	276	510	786	2032
	347			899			786			
	2032									

Таблица 4

Стоимость создания сетей ГКД по НТД при строительстве и реконструкции объектов

Сеть	Пункты, созданные при строительстве, шт.	Стоимость создания, тыс. руб.	Пункты, созданные при реконструкции, шт.	Стоимость создания, тыс. руб.	Итого пунктов, шт.	Суммарная стоимость, тыс. руб.	Уровень
ОГС	24	3 076	84	10 766	108	13 842	Федеральный
КС	10	1 281	22	2 819	32	4 101	
ГРО	35	4 485	131	16 790	166	21 276	
МГРО	41	5 255	–	–	41	5 255	
Суммарно по уровню	110	14 098	237	30 376	347	44 475	
ОГС	121	15 508	222	28 453	343	43 962	Региональный
КС	42	5 383	44	5 639	86	11 022	
ГРО	130	16 662	260	33 324	390	49 986	
МГРО	68	8 715	12	1 538	80	10 253	
Суммарно по уровню	361	46 269	538	68 955	899	115 225	
ОГС	141	18 072	254	32 555	395	50 627	Муниципальный
КС	20	2 563	30	3 845	50	6 408	
ГРО	99	12 688	226	28 966	325	41 655	
МГРО	16	2 050	–	–	16	2 050	
Суммарно по уровню	276	35 375	510	65 367	786	100 742	
Суммарно по округу	747	95 743	1285	164 699	2032	260 443	

которого выявлена тенденции снижения нормативной плотности наземных геодезических сетей. Фактическая плотность пунктов геодезических сетей для ряда регионов РФ является неудовлетворительной для выполнения кадастровых работ и землеустройства методами классической геодезии в условиях глушения спутникового сигнала;

– обоснована возможность использования пунктов ГКД в качестве основы для целей кадастра и землеустройства;

– сформирована и реализована в ПО структура специализированной БД ГИС технического заказчика, обеспечивающая унификацию и автоматизированную передачу сведений о пунктах ГКД, что создает необходимый информационный фундамент

для ведения национальной системы пространственных данных;

– предложены рекомендации по использованию таких пунктов при проведении кадастровых работ с учетом специфики строительных геодезических сетей;

– результаты апробации разработанной методики на территории Истринского городского округа Московской области свидетельствуют, что внедрение результатов исследования в производство способно увеличить плотность геодезической основы в 75 раз (с 0.02 до 1.5 пункта на 1 км²). Экономический эффект от реализации системы в масштабах округа оценивается в 260 млн. рублей за счет исключения затрат на повторную закладку пунктов.

Список литературы

1. Толстухин А.И., Ямщикова К.А. Анализ плотности геодезических сетей Медведевского района Республики Марий Эл // Материалы науч.-практ. конф. Науки о Земле: от теории к практике (Арчиловские чтения –2020). Чебоксары: Издательский дом «Среда». 2020. С. 388-391.
2. Пех К.А., Пех А.А., Хугаева Л.М. Проблема уничтожения пунктов государственной геодезической сети в Алагирском районе РСО-Алания в 2022 году и способы ее решения // Сб. материалов науч.-практ. конф. Нефтегазовое дело, техносферная безопасность, рациональное природопользование: современные реалии. Махачкала: Информационно-полиграфический центр ДГТУ. 2023. С. 173-176.
3. Гагаонов А.З., Габачиева А.З., Дудиева Д.С., Пех А.А. Изучение состояния пунктов государственной геодезической сети в РСО-Алания (на примере геоточки «подлесный» пригородного района) // Сб. тр. конф. Аграрная наука на Севере – сельскому хозяйству. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании. 2024. С. 39-42. DOI: 10.24412/cl-37231-2024-1-39-42.
4. Смирнова Е.К., Заварин Д.А., Лахтионова А.В., Наумкова В.А., Скородумова Е.С. ОПОРНАЯ МЕЖЕВАЯ СЕТЬ ВЫТЕГОРСКОГО РАЙОНА ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ // Московский экономический журнал. 2022. №1. С. 27-38. DOI: 10.55186/2413046X_2022_7_1_22.
5. Вдовин В.С., Дворкин В.В., Карпик А.П., Липатников Л.А., Сорокин С.Д., Стеблов Г.М. Проблемы и перспективы развития активных спутниковых геодезических сетей в России и их интеграции в ITRF // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23. №1. С. 6-27.
6. C. Bruyninx, J. Legrand, A. Fabian, E. Pottiaux. GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network. GPS Solutions. 2019. Vol. 23. Article 106. DOI: 10.1007/s10291-019-0880-9.
7. The Federal Agency for Cartography and Geodesy. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG). URL: <https://geodesy.science/glossary/bkg-bundesamt-fur-kartographie-und-geodasie>.

8. Кузовлев Н.А., Юнусов А.Г., Костеша В.А., Лысенкова Е.А. Анализ состояния пунктов геодезических сетей для выполнения кадастровых работ в Истринском городском округе Московской области // Геодезия и картография. 2025. №9. С. 50-59. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1023-9-50-59.
9. Кузовлев Н.А. Обзор типов пунктов ГССН и обоснование пригодности их конструкций для проведения кадастровых работ // Недели науки – 2025: Материалы всероссийской научно-практической конференции. Москва. 17 апреля 2025 года. Москва: Издательство «Перо», Российский университет транспорта (МИИТ). 2025. С. 99-105. EDN XVRCCZ.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026660642 Российская Федерация. Управление пунктами ГКД: №2026619735: дата заявления 08.04.2026: дата опубликования 14.04.2026 / Кузовлев Н.А., Юнусов А.Г., Костеша В.А., [и др.]; правообладатель Кузовлев Никита Александрович (RU).
11. Аврунев Е.И., Хорошилов В.С., Метелева М.В. Исследование структуры геодезического обоснования для обеспечения кадастровой деятельности в территориальном образовании // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. №55. С. 82-86.
12. Федеральный фонд пространственных данных. Сведения о государственной геодезической сети. URL: <https://fsgs.cgkipd.ru/> (дата обращения: 14.05.2026).

References

1. Tolstukhin A.I., Yamshchikova K.A. *Analiz plotnosti geodezicheskikh setey Medvedevskogo rayona Respubliki Mariy El* [Analysis of the density of geodetic networks in the Medvedev district of the Mari El Republic]. Proceedings of the scientific and practical conference. Earth Sciences: From Theory to Practice (Archikov Readings – 2020). Cheboksary: Sreda Publishing House. 2020. Pp. 388-391.
2. Pekh K.A., Pekh A.A., Khugaeva L.M. *Problema unichtozheniya punktov gosudarstvennoy geodezicheskoy seti v Alagirskom rayone RSO-Alaniya v 2022 godu i sposoby yeye resheniya* [The problem of the destruction of state geodetic network points in the Alagir district of the Republic of North Ossetia-Alania in 2022 and ways to solve it]. Collection of materials from the scientific-practical conference. Oil and gas industry, technosphere safety, rational nature management: modern realities. Makhachkala: Information and Printing Center of DSTU. 2023. Pp. 173-176.
3. Gatagonov A.Z., Gabachieva A.Z., Dudieva D.S., Pekh A.A. *Izucheniye sostoyaniya punktov gosudarstvennoy geodezicheskoy seti v RSO-Alaniya (na primere geotочки «podlesnyy» prigorodnogo rayona)* [A study of the state of the state geodetic network points in the Republic of North Ossetia-Alania (using the example of the «Podlesny» geopoint in the suburban district)]. Sat. tr. conf. Agricultural science in the North - agriculture. Kirov: Interregional Center for Innovative Technologies in Education. 2024. Pp. 39-42. DOI: 10.24412/cl-37231-2024-1-39-42.
4. Smirnova E.K., Zavarin D.A., Lakhtionova A.V., Naumkova V.A., Skorodumova E.S. SUPPORT SURVEY NETWORK OF THE VYTEGORSKY DISTRICT OF THE VOLOGDA REGION. *Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal*. 2022. No. 1. Pp. 27-38. DOI: 10.55186/2413046X_2022_7_1_22.
5. Vdovin V.S., Dvorkin V.V., Karpik A.P., Lipatnikov L.A., Sorokin S.D., Steblov G.M. Problems and prospects for the development of active satellite geodetic networks in Russia and their integration into the ITRF. *Vestnik SGUGiT*. 2018. V. 23. No. 1. Pp. 6-27.
6. C. Bruyninx, J. Legrand, A. Fabian, E. Pottiaux. GNSS metadata and data validation in the EUREF Permanent Network. *GPS Solutions*. 2019. Vol. 23. Article 106. DOI: 10.1007/s10291-019-0880-9.
7. The Federal Agency for Cartography and Geodesy. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG). URL: <https://geodesy.science/glossary/bkg-bundesamt-fur-kartographie-und-geodasie>.
8. Kuzovlev N.A., Yunusov A.G., Kostesha V.A., Lysenkova E.A. Analysis of the state of geodetic network points for cadastral work in the Istra urban district of the Moscow region. *Geodeziya i kartografiya*. 2025. No. 9. Pp. 50-59. DOI: 10.22389/0016-7126-2025-1023-9-50-59.
9. Kuzovlev N.A. *Obzor tipov punktov GSSN i obosnovaniye prigodnosti ikh konstruksiy dlya provedeniya kadastrykh rabot* [Review of GSSN point types and justification of the suitability of their designs for cadastral work]. Science Weeks 2025: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference. Moscow, April 17, 2025. Moscow: Pero Publishing House, Russian University of Transport (MIIT). 2025. Pp. 99-105. EDN XVRCCZ.
10. Kuzovlev N.A., Yunusov A.G., Kostesha V.A., [et al.]. Certificate of State Registration of Computer Program No. 2026660642 Russian Federation. State Registration Office: No. 2026619735: application date 04/08/2026: publication date 04/14/2026. Copyright holder Kuzovlev Nikita Aleksandrovich (RU).
11. Avrunev E.I., Khoroshilov V.S., Meteleva M.V. Study of the structure of geodetic justification for ensuring cadastral activities in a territorial entity. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos"yemka*. 2015. No. S5. Pp. 82-86.
12. Federal Spatial Data Foundation. Information on the State Geodetic Network. URL: <https://fsgs.cgkipd.ru/> (accessed on: 14.05.2026).

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Кузовлев Никита Александрович

ассистент кафедры геодезии и геоинформатики, Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

Юнусов Альберт Гамзатович

кандидат технических наук, профессор кафедры геодезии и геоинформатики, Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

Information about authors Affiliations

Kuzovlev Nikita Alexandrovich

Assistant of the Department of Geodesy and Geoinformatics, State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Yunusov Albert Gamzatovich

Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Geodesy and Geoinformatics, State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 15.05.2026 г.

РЕЖИМНО-СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПЫЛЕПРИГОТОВЛЕНИЯ И СЖИГАНИЯ НЕФТЯНОГО КОКСА В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛАХ

Ганиев Д.Л., Ильин В.К., Хайбуллина А.И.

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»,
420066, Казань, Россия
e-mail: ilyinvk@mail.ru

В статье обоснованы режимные условия приготовления и пылевидного сжигания нефтяного кокса в энергетических котлах, ранее работавших на газомазутном топливе. Рассмотрена модернизированная система пылеприготовления с паровой сушкой, шаровой барабанной мельницей, сепарацией, очисткой сушильного агента и пневмотранспортом готовой пыли. Цель работы состояла в выделении режимных факторов, определяющих устойчивость сушки, помола, транспортирования и безопасного хранения коксовой пыли. Использованы агрегированные данные опытного пуска, расчетно-режимная матрица и лабораторные сведения о влажности и дисперсности топлива. Получены диагностические линейные зависимости температуры сушильного агента за сепаратором от расхода и влажности сырого топлива. Предложен безразмерный коэффициент режимной устойчивости, связывающий вентиляцию мельницы, температуру за сепаратором и фактическую тонкость пыли. Показано, что риск тления определяется не отдельной температурой, а совокупностью факторов: сниженной вентиляцией, сверхтонким помолом, низкой остаточной влажностью, временем накопления сухой пыли и условиями теплоотвода.

Ключевые слова: нефтяной кокс, пылевидное сжигание, пылеприготовление, тепловой баланс, диагностическая аппроксимация, самонагревание пыли, газовая подсветка, режимная устойчивость.

REGIME-STATISTICAL JUSTIFICATION OF PETROLEUM COKE PULVERIZING AND COMBUSTION IN POWER BOILERS

Ganiyev D.L., Il'in V.K., Khaybullina A.I.

Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

The paper presents an operating approach for petroleum coke pulverizing and pulverized-fuel combustion in power boilers converted from gas-and-oil firing. The study focuses on the technological chain that includes preliminary drying, ball-mill grinding, separation, dust collection and pneumatic transport of the prepared fuel. The empirical basis consists of aggregated start-up observations, laboratory data and a calculated matrix of operating states. The results indicate that stable operation cannot be assessed by separator outlet temperature alone. Moisture stratification in raw coke, mill ventilation, dust fineness and the residence time of dry deposits must be considered simultaneously. Two diagnostic linear relationships are obtained for separator outlet temperature as a function of raw-fuel flow rate and moisture content. A dimensionless operating-stability coefficient is introduced to compare actual regimes with the recommended operating domain. The proposed approach can be used for updating start-up procedures and risk-oriented operating maps for petroleum-coke pulverizing systems.

Keywords: petroleum coke, pulverized combustion, pulverizing system, heat balance, diagnostic approximation, dust self-heating, gas support, operating stability.

1. Введение

Нефтяной кокс относится к высокоуглеродистым низкорекреационным твердым топливам. Его энергетическое использование привлекательно вследствие высокой теплоты сгорания и низкой зольности, однако низкий выход летучих веществ, развитая пористая структура и повышенная доля фиксированного углерода усложняют воспламенение и выгорание частиц [9,13,15]. Для действующих газомазутных котлов практический интерес представляет модернизация с организацией отдельного узла пылеприготовления, газовой поддержки розжига и стабилизации факела, а также системы очистки дымовых газов [1,4].

В опубликованных исследованиях основное внимание уделяется горению нефтяного кокса в кипящем и циркулирующем кипящем слоях, кинетике окисления, использованию каталитических добавок и совместному сжиганию с углем или биомассой

[6-12,14,16]. Для пылевидного сжигания в энергетических котлах не менее важным является предшествующий этап подготовки топлива: сушка, измельчение, сепарация, транспортирование и накопление готовой пыли. Эти операции определяют как полностью выгорания, так и пожарную безопасность тракта.

Цель работы – обосновать режимные условия, при которых пылевидное сжигание нефтяного кокса может быть реализовано без раскрытия конфиденциальных сведений о полном компонентном составе топлива и детальной конфигурации объекта. В отличие от описательных подходов, в работе выделены расчетно-статистические показатели, позволяющие количественно интерпретировать опытный пуск и режимные карты.

Научная новизна работы заключается в следующем: для условий модернизированной системы пылеприготовления выделена переходная область влажности сырого топлива 6-9%, в которой

одновременно возрастают риски потери сыпучести, налипания и нестабильности сушки; для агрегированных точек опытного пуска получены диагностические линейные аппроксимации температуры за сепаратором от расхода и влажности топлива; предложен безразмерный коэффициент режимной устойчивости $K_{гн}$, связывающий вентиляцию мельницы, температуру за сепаратором и фактическую тонкость пыли; показано различие между минимальной группой взрывоопасности по критерию K_t и реальным риском тления отложенной сухой пыли.

2. Материалы и методы исследования

Объектом анализа является система пылеприготовления действующей теплоэлектроцентрали с котлоагрегатами типа ТГМЕ-464. Система предназначена для получения сухой коксовой пыли с остаточной влажностью не более 1% и расчетной тонкостью $R_{90}=6-8\%$. Технологическая линия включает бункер сырого кокса, питатель, паровую панельную сушилку, шаровую барабанную мельницу, сепаратор, циклон, рукавный фильтр и пневмотранспорт готовой пыли. Конкретная компоновка узлов и полный компонентный состав топлива в статье не раскрываются.

Исходная информационная база включала визуальное обследование тракта пылеприготовления, агрегированные параметры опытного пуска, лабораторную оценку влажности и дисперсности проб, поверочные тепловые балансы сушилки и мельницы, а также расчетные режимные карты. Для повышения корректности интерпретации данные разделены на две группы: фактическая выборка опытного пуска и расчетно-режимная матрица, полученная при варьировании влажности и расхода топлива.

Тепловой баланс записывался в форме равенства приходных и расходных тепловых потоков. Приходные статьи включали тепло пара, вентиляционного воздуха, рециркуляции сушильного агента, горячих газов и механической работы мельницы; расходные статьи включали испарение влаги, подогрев топлива, вынос тепла сушильным агентом и потери в окружающую среду [5,7,13]. Для оценки испаренной влаги использовалась зависимость:

$$G_w = G_f(W_1 - W_2)/(100 - W_2),$$

где G_f – расход топлива, т/ч; W_1 и W_2 – влаж-

ность до и после стадии сушки, %; G_w – количество испаренной влаги, т/ч.

Для описания низкотемпературного тепловыделения при окислении сухой пыли использовалась полуэмпирическая зависимость:

$$q = A S_{\text{spec}} C_{O_2}^n \exp[-E/(RT)] \phi(W),$$

где A – эмпирический коэффициент; S_{spec} – удельная реакционная поверхность; C_{O_2} – концентрация кислорода; n – порядок реакции по кислороду; E – эффективная энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; $\phi(W)$ – поправка на влажность. Самонагревание развивается при превышении тепловыделения над теплоотводом из слоя пыли.

3. Результаты и математическая обработка

Опытный пуск показал, что длительное хранение сырого кокса в бункере приводит к неоднородности влажности по высоте слоя. Из-за гидрофобности материала свободная влага смещается в нижние зоны, поэтому фактическая влажность топлива на входе в систему может кратковременно превышать среднее проектное значение. После сработки части слоя влажность поступающего топлива снижается.

Даже при отключенном генераторе горячих газов и сниженном расходе пара наблюдался рост температуры сушильного агента за сепаратором. Это указывает на положительный тепловой баланс мельничного узла при малой загрузке: вклад вносят механическая работа мелющих тел, рециркуляция нагретого сушильного агента и уменьшенный теплоотвод с топливом.

Для агрегированных точек пусковой траектории выполнена линейная аппроксимация зависимости температуры за сепаратором от расхода сырого топлива:

$$T_{\text{sep}} = 3.19G + 16.87, R^2 = 0.972.$$

В пределах наблюдаемого диапазона увеличение расхода сопровождалось ростом температуры, однако зависимость следует рассматривать как диагностическую: одновременно изменялись влажность топлива и вентиляция мельницы. Экстраполяция за пределы указанного диапазона недопустима.

Дополнительно получена аппроксимация тем-

Таблица 1

Объем использованного расчетно-эксплуатационного материала

Группа данных	Количество режимов	Диапазон расхода сырого топлива	Диапазон влажности	Назначение данных
Опытный пуск	3 агрегированные точки	≈14-30 т/ч	≈5.7-16.6 %	Проверка фактической траектории роста температуры
Расчетно-режимная матрица	9 расчетных состояний	20-56.3 т/ч	8-12 %	Определение диапазонов пара, горячих газов и холодного воздуха
Лабораторные данные	серии проб	обезличено	обезличено	Подтверждение влажности, дисперсности и склонности сухой пыли к тлению

Таблица 2

Агрегированные параметры опытного пуска

Расход сырого топлива, т/ч	Влажность сырого топлива, %	Расход пара, т/ч	Вентиляция мельницы, тыс. м³/ч	Температура за сепаратором, °С
≈14	≈16.6	≈1.7	≈70-105	≈59-94
≈22	≈9.0	≈1.4	≈105	≈90-92
≈30	≈5.7	≈1.5	≈85-100	≈96-110

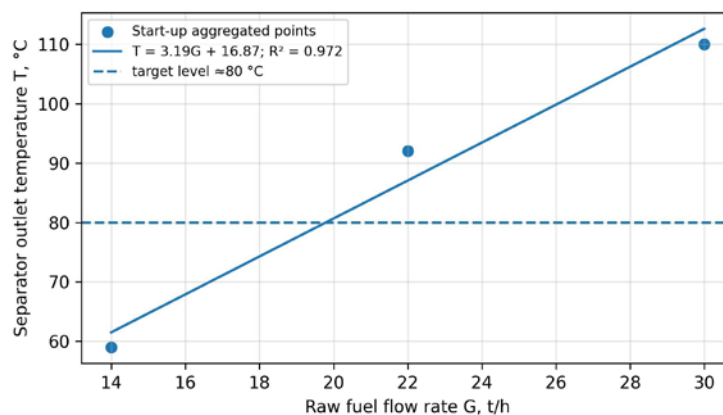


Рис. 1. Регрессионная аппроксимация температуры за сепаратором по агрегированным точкам опытного пуска

пературы за сепаратором по влажности сырого топлива:

$$T_{\text{sep}} = -4.62W + 135.20, R^2 = 0.997.$$

Отрицательный коэффициент при W отражает фактическую траекторию пуска: по мере сработки нижнего переувлажненного слоя снижалась влажность поступающего топлива, но возрастал вклад положительного теплового баланса мельничного узла.

4. Коэффициент режимной устойчивости

Для количественного усиления выводов введен

безразмерный коэффициент режимной устойчивости $K_{\text{ру}}$. Он не является универсальным нормативным критерием, а используется как диагностический показатель для сопоставления фактических режимов с рекомендуемой областью работы системы пылеприготовления:

$$K_{\text{ру}} = (V_m/120) \cdot (80/T_{\text{sep}}) \cdot (R_{90}/7),$$

где V_m – вентиляция мельницы, тыс. м³/ч; T_{sep} – температура за сепаратором, °С; R_{90} – остаток на сите 90 мкм, %. В качестве базовых значений приняты $V_m=120$ тыс. м³/ч, $T_{\text{sep}}=80^\circ\text{C}$ и $R_{90}=7\%$.

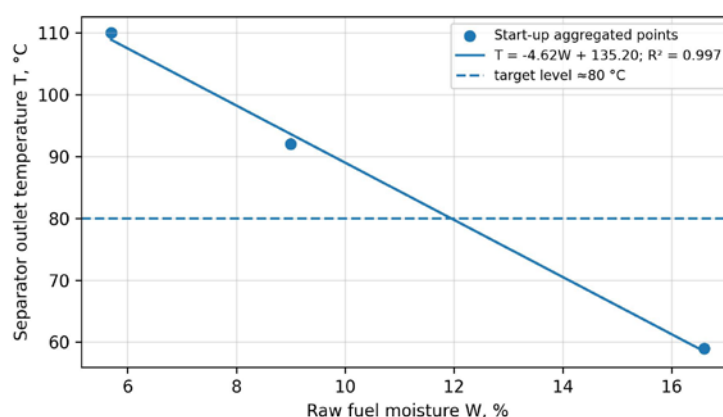


Рис. 2. Диагностическая зависимость температуры за сепаратором от влажности сырого топлива

Таблица 3

Расчетные диапазоны режимных воздействий при стабилизации температуры за сепаратором около 80°C

Влажность сырого топлива, %	Расход сырого топлива, т/ч	Пар на ППС, т/ч	Горячие газы, м³/ч	Холодный воздух в мельницу, м³/ч
12	20-56.3	2.40-5.45	0-36000	0-15000
10	20-56.3	2.17-4.67	0-25500	0-21000
8	20-56.3	1.94-4.02	0-17740	0-27000

Снижение K_{ru} указывает на одновременное ухудшение вентиляции, перегрев тракта и чрезмерное утонение пыли.

Полученные значения K_{ru} ниже рекомендуемой области, что объясняется сочетанием сниженной вентиляции мельницы, фактической тонкости пыли R_{90} около 3% вместо расчетных 6-8% и повышенной температуры за сепаратором. Следовательно, основным направлением стабилизации является не только ограничение температуры, но и возврат к проектной вентиляции и требуемой тонкости помола.

5. Причины тления и режимные ограничения

Фактические очаги тления были связаны преимущественно с готовой сухой пылью, находящейся в накопленном объеме более суток: в сепараторе, патрубках, бункерах и фильтрующих элементах. Для сырого топлива устойчивого тления не установлено. Это согласуется с механизмом низкотемпературного окисления: с уменьшением влажности и размера частиц возрастает удельная поверхность контакта с кислородом, а в застойном слое ухудшается теплоотвод [5,7,15].

Расчет критерия взрываемости для исследованных проб дает $K_t=0.72-0.77$, что соответствует минимальной группе взрывоопасности. Этот вывод не снимает пожарных рисков: взрывоопасность аэрозоля и склонность отложенной пыли к тлению являются разными эксплуатационными опасностями. Поэтому главным направлением управления риском является устранение длительного накопления сухой пыли, поддержание проектной вентиляции мельницы и недопущение сверхтонкого помола.

С учетом физико-химической природы нефтя-

ного кокса критической является не одна величина влажности, а две разные области: для сырого топлива переходная зона 6-9% связана с потерей сыпучести и налипанием, а для готовой пыли влажность менее 1% при высокой дисперсности повышает склонность отложений к самонагреванию. Поэтому режимная карта должна одновременно учитывать сушильную производительность, вентиляцию и допустимое время нахождения пыли в накопленном объеме.

6. Практические рекомендации

Для промышленной эксплуатации целесообразно поддерживать вентиляцию шаровой барабанной мельницы не ниже 120 тыс. $m^3/ч$ и регулировать сепаратор так, чтобы готовая пыль соответствовала проектной тонкости $R_{90}=6-8\%$. Температуру сушильного агента за сепаратором следует удерживать около $80^{\circ}C$; дальнейшее снижение требует контроля точки росы, поскольку работа ниже безопасного температурного запаса вызывает конденсацию, налипание пыли и последующее тление.

На низких нагрузках необходимо компенсировать положительный тепловой баланс мельницы увеличением расхода холодного воздуха либо иным конструктивным способом отвода избытка тепла. При высокой влажности сырого топлива первичным регулирующим воздействием остается расход пара на паровую панельную сушилку, а при снижении влажности – перераспределение расходов горячих газов и холодного воздуха.

В схему контроля следует включать непрерывный мониторинг температуры в застойных зонах, состояния рукавного фильтра, влажности сырого топлива и разрежения или перепада давления на мельнице. Для дальнейшего усиления доказательной

Таблица 4

Диагностическая оценка K_{ru} по агрегированным режимам опытного пуска

Расход сырого топлива, т/ч	V_m , тыс. $m^3/ч$	T_{sep} , $^{\circ}C$	R_{90} , %	K_{ru}
≈ 14	87.5	94	3	0.27
≈ 22	105.0	92	3	0.33
≈ 30	92.5	110	3	0.24

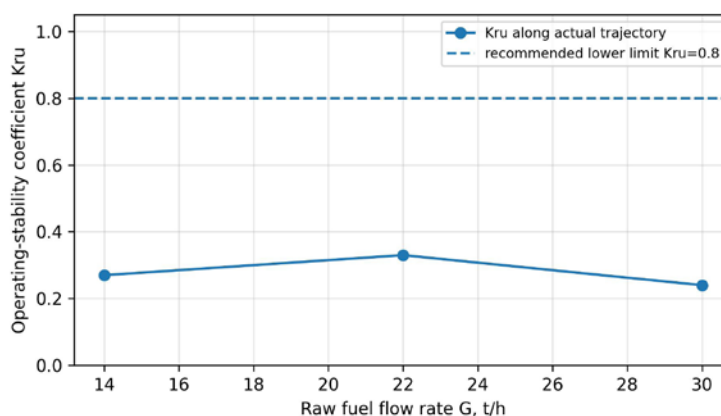


Рис. 3. Изменение коэффициента режимной устойчивости в фактической пусковой траектории

базы рекомендуется расширить промышленную выборку: фиксировать не менее 20-30 устойчивых режимов в диапазоне нагрузок 20-56.3 т/ч, повторять режимы при близкой влажности сырого топлива, отдельно учитывать положение лопаток сепаратора и фактическое значение R90, а также регистрировать температуру за сепаратором не только как конечное значение, но и как временной ряд.

Заключение

1. Пылевидное сжигание нефтяного кокса в энергетических котлах возможно при выделении подготовки топлива в самостоятельную регулируемую систему и применении газовой поддержки горения.

2. Научная новизна уточнена через расчетно-статистические признаки: выделение переходной области влажности 6-9%, получение диагностических регрессионных зависимостей температуры за

сепаратором и введение коэффициента режимной устойчивости $K_{ру}$.

3. Для агрегированных точек опытного пуска получены зависимости $T_{sep}=3.19G+16.87$ ($R^2=0.972$) и $T_{sep}=135.20-4.62W$ ($R^2=0.997$). Их следует применять только в пределах исследованного диапазона как диагностические, а не универсальные расчетные уравнения.

4. Ключевыми параметрами надежности являются влажность готовой пыли не более 1%, расчетная тонкость $R90=6-8\%$, вентиляция мельницы не менее 120 тыс. м³/ч и температура сушильного агента за сепаратором около 80°C.

5. Основной эксплуатационный риск связан не с сырым топливом, а с сухой пылью, длительно находящейся в накопленном объеме. Механизм риска определяется низкотемпературным окислением и ухудшением теплоотвода в отложениях.

Список литературы

- Брагина О.Н., Булысова Л.А., Володин А.М., Епихин А.Н. Моделирование и усовершенствование конструкции скруббера охлаждения дымового газа от сжигания мазута и нефтяного кокса на ТЭС // Электрические станции. 2018. №7. С. 19-26.
- Иваницкий М.С. Сжигание нефтяного кокса марки К2 на ТЭС (на примере котла ТП-80) // Энергосбережение и водоподготовка. 2018. №3. С. 13-18.
- Иваницкий М.С. Сжигание твердого топлива в котлах малой тепловой мощности // Энергосбережение и водоподготовка. 2020. №5. С. 56-61.
- Пак Д.Ф., Кучеров В.В., Шабанов И.И., Епихин А.Н., Тресков И.В., Кудрявцев С.А. Применение инновационных технологий в проекте реконструкции котлоагрегатов ТГМЕ-464 Нижнекамской ТЭЦ для пылевого сжигания нефтяного кокса // Электрические станции. 2018. №10. С. 23-29.
- Швандин С.А., Халатов А.А. Тепломассообмен и горение дисперсных топлив. М.: Энергоатомиздат. 1990. 240 с.
- Anthony E.J., Granatstein D.L. Sulfation phenomena in fluidized bed combustion systems. Progress in Energy and Combustion Science. 2001. No. 27. Pp. 215-236.
- Basu P. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. Boca Raton: CRC Press. 2006. 496 p.
- Bora A., Mahapatra S. Experimental study on combustion characteristics of Bambusa tulda and petcoke at varying blending ratios. Energy. 2025. 320. 135383. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135383.
- Chen J., Lu X. Progress of petroleum coke combustions in circulating fluidized bed boilers – a review and future perspectives. Resources, Conservation and Recycling. 2007. No. 49(3). Pp. 203-216. DOI: 10.1016/j.resconrec.2006.03.012.
- Jameel A.G.A. Comprehensive CFD Investigation of Oxyfuel Combustion in Petcoke-Fired Boilers for Carbon Capture. Proceedings of the 17th Greenhouse Gas Control Technologies Conference (GHGT-17). 2024. DOI: 10.2139/ssrn.5010481.
- Li L., Sun G., Qi W., Wei J., Chen Q., Niu W., Hao D., Yuan Y., Sun Z., Duan L. Improvement of coal and petroleum coke combustion in a fluidized bed by using ilmenite ore as bed material. Journal of the Energy Institute. 2023. 111. 101400. DOI: 10.1016/j.joei.2023.101400.
- Liu Y., Tan W., Liang S., Bi X. Effect of limestone on NO emission during the co-combustion of semi-coke and bituminous coal. Journal of Thermal Science. 2024. No. 33(6). Pp. 2413-2425. DOI: 10.1007/s11630-024-2045-6.
- Miller B.G. Coal Energy Systems. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press. 2017. 856 p.
- Saifullin E.R., Sadikov K.G., Varfolomeev M.A., Emelianov D.A., Rodionov N.O. Petroleum coke combustion in fixed fluidized bed mode in the presence of metal catalysts. ACS Omega. 2020. No. 5(35). Pp. 22171-22178. DOI: 10.1021/acsomega.0c02250.
- Speight J.G. The Chemistry and Technology of Petroleum. 5th ed. Boca Raton: CRC Press. 2014. 953 p.
- Wang P., Liu H., Zhang S., Li X., Wang Q. Co-combustion behavior and kinetics of semi-coke and bituminous coal: influence of blending method and oxygen concentration. Fuel Processing Technology. 2023. 252. 107962. DOI: 10.1016/j.fuproc.2023.107962.

References

- Bragina O.N., Bulysova L.A., Volodin A.M., Epikhin A.N. Modeling and improvement of the design of a flue-gas cooling scrubber for fuel oil and petroleum coke combustion at thermal power plants. *Elektricheskie stantsii*. 2018. No. 7. Pp. 19-26.
- Ivanitskii M.S. Combustion of K2 petroleum coke at thermal power plants: the TP-80 boiler case. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2018. No. 3. Pp. 13-18.
- Ivanitskii M.S. Solid fuel combustion in low-capacity boilers. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2020. No. 5. Pp. 56-61.
- Pak D.F., Kuchero V.V., Shabanov I.I., Epikhin A.N., Treskov I.V., Kudryavtsev S.A. Application of innovative technologies in the reconstruction project of TGME-464 boiler units of Nizhnekamsk CHP for pulverized petroleum coke combustion. *Elektricheskie stantsii*. 2018. No. 10. Pp. 23-29.
- Shvandin S.A., Khalatov A.A. *Teplomassoobmen i gorenie dispersnykh topliv* [Heat and Mass Transfer and Combustion of Dispersed Fuels]. Moscow. Energoatomizdat. 1990. 240 p.
- Anthony E.J., Granatstein D.L. Sulfation phenomena in fluidized bed combustion systems. Progress in Energy and Combustion Science. 2001. No. 27. Pp. 215-236.
- Basu P. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. Boca Raton: CRC Press. 2006. 496 p.
- Bora A., Mahapatra S. Experimental study on combustion characteristics of Bambusa tulda and petcoke at varying blending ratios. Energy. 2025. 320. 135383. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135383.

9. Chen J., Lu X. Progress of petroleum coke combusting in circulating fluidized bed boilers – a review and future perspectives. Resources. Conservation and Recycling. 2007. No. 49(3). Pp. 203-216. DOI: 10.1016/j.resconrec.2006.03.012.
10. Jameel A.G.A. Comprehensive CFD Investigation of Oxyfuel Combustion in Petcoke-Fired Boilers for Carbon Capture. Proceedings of the 17th Greenhouse Gas Control Technologies Conference (GHGT-17). 2024. DOI: 10.2139/ssrn.5010481.
11. Li L., Sun G., Qi W., Wei J., Chen Q., Niu W., Hao D., Yuan Y., Sun Z., Duan L. Improvement of coal and petroleum coke combustion in a fluidized bed by using ilmenite ore as bed material. Journal of the Energy Institute. 2023. 111. 101400. DOI: 10.1016/j.joei.2023.101400.
12. Liu Y., Tan W., Liang S., Bi X. Effect of limestone on NO emission during the co-combustion of semi-coke and bituminous coal. Journal of Thermal Science. 2024. No. 33(6). Pp. 2413-2425. DOI: 10.1007/s11630-024-2045-6.
13. Miller B.G. Coal Energy Systems. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press. 2017. 856 p.
14. Saifullin E.R., Sadikov K.G., Varfolomeev M.A., Emelianov D.A., Rodionov N.O. Petroleum coke combustion in fixed fluidized bed mode in the presence of metal catalysts. ACS Omega. 2020. No. 5(35). Pp. 22171-22178. DOI: 10.1021/acsomega.0c02250.
15. Speight J.G. The Chemistry and Technology of Petroleum. 5th ed. Boca Raton: CRC Press. 2014. 953 p.
16. Wang P., Liu H., Zhang S., Li X., Wang Q. Co-combustion behavior and kinetics of semi-coke and bituminous coal: influence of blending method and oxygen concentration. Fuel Processing Technology. 2023. 252. 107962. DOI: 10.1016/j.fuproc.2023.107962.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Ганиев Динар Ленарович

аспирант кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, Казань, Россия

Ильин Владимир Кузьмич

доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, заведующий кафедрой «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, Казань, Россия

Хайбуллина Айгуль Ильгизаровна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Энергообеспечение предприятий, строительство зданий и сооружений», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, Казань, Россия

Information about authors
Affiliations

Ganiev Dinar Lenarovich

Postgraduate Student of the Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures, Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Ilyin Vladimir Kuzmich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Head of the Department of «Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures», Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Khaibullina Aigul Ilgizarovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Energy Supply of Enterprises, Construction of Buildings and Structures, Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Поступила в редакцию 14.05.2026 г.

МОНИТОРИНГ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГИБРИДНЫХ АВТОМОБИЛЯХ С АДАПТИВНЫМ ЭНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТОМ

¹Чжан Цзин, ²Сяо Гуйян, ³Купцова О.В., ¹Му Яннань

¹Хэйхэский университет, 164300, Хэйхэ, Китай

²Народное правительство поселка Ванъян города Тели, 153000, Ичунь, Китай

³Сахалинский государственный университет, 693008, Южно-Сахалинск, Россия

e-mail: korsuncevaolesy@gmail.com

В статье решается задача повышения энергоэффективности гибридных силовых установок на основе топливных элементов и аккумуляторных батарей. Целью исследования является разработка адаптивной стратегии энергоменеджмента, позволяющей избежать работы топливного элемента в зонах низкой эффективности и продлить срок службы аккумулятора. Предложена имитационная модель гибридной системы на платформе MATLAB/Simulink, включающая протонно-обменный мембранный топливный элемент (PEMFC), литий-ионную аккумуляторную батарею, DC/DC-преобразователь, синхронный двигатель с постоянными магнитами и систему управления энергией. Научная новизна заключается в разработке адаптивного управления с разделением зон зарядового состояния аккумулятора (SOC): низкая ($\leq 40\%$), средняя (40-80%) и высокая ($\geq 80\%$) с гистерезисным переходом. Вклад авторов: Чжан Цзин – разработка имитационной модели и проведение вычислительных экспериментов; Сяо Гуйян – анализ данных и обобщение результатов. Эксперименты проведены на городском ездовом цикле. Му Яннань – руководство структурой научной работы. Результаты показали, что предложенная стратегия поддерживает SOC в диапазоне 40-80%, предотвращает перезаряд и глубокий разряд, а также обеспечивает работу топливного элемента преимущественно в зоне максимальной эффективности. Разработанная модель может быть рекомендована для геоинформационной поддержки при проектировании энергоустановок гибридных транспортных средств и мониторинге их эксплуатационных параметров.

Ключевые слова: геоинформационное моделирование, топливный элемент, гибридная силовая установка, энергоменеджмент, адаптивное управление, SOC, MATLAB/Simulink.

CONSIDERATION OF FUEL CELL EFFICIENCY IN HYBRID VEHICLES WITH ADAPTIVE ENERGY MANAGEMENT

¹Zhang Jing, ²Xiao Guiyang, ³Kuptsova O.V., ¹Mu Yannan

¹Heihe University, 164300, Heihe, China

²Tieli City Wangyang Township People's Government, 153000, Yichun, China

³Sakhalin State University, 693008, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

The paper addresses the problem of improving the energy efficiency of hybrid power systems based on fuel cells and batteries. The aim of the study is to develop an adaptive energy management strategy that avoids fuel cell operation in low-efficiency zones and extends battery service life. A simulation model of the hybrid system is proposed using the MATLAB/Simulink platform, including a proton-exchange membrane fuel cell (PEMFC), a lithium-ion battery, a DC/DC converter, a permanent magnet synchronous motor, and an energy management system. The scientific novelty lies in the development of adaptive control with state-of-charge (SOC) zones: low ($\leq 40\%$), medium (40-80%), and high ($\geq 80\%$) with hysteresis transition. Author contributions: Zhang Jing – development of the simulation model and computational experiments; Xiao Guiyang – data analysis and results generalization. Experiments were conducted on an urban driving cycle. Mu Yannan – helped with the paper structure. The results show that the proposed strategy maintains SOC within the 40-80% range, prevents overcharge and deep discharge, and ensures fuel cell operation predominantly in the maximum efficiency zone. The developed model can be recommended for geoinformation support in designing hybrid vehicle power systems and monitoring their operational parameters.

Keywords: geographic information modelling, fuel cell, hybrid power system, energy management, adaptive control, SOC, MATLAB/Simulink.

Введение

В условиях глобального энергетического перехода и ужесточения экологических требований к автомобильному транспорту гибридные силовые установки на основе топливных элементов (ТЭ) и аккумуляторных батарей (АКБ) привлекают всё большее внимание исследователей и производителей. Топливные элементы обладают высокой энергетической плотностью и нулевым уровнем выбросов, однако характеризуются медленной динамической реакцией при резких изменениях нагрузки. Акку-

муляторные батареи, напротив, обеспечивают быстрый отклик и способны рекуперировать энергию торможения, но имеют ограниченный ресурс и подвержены деградации при глубоких разрядах или перезаряде [1,4,6].

Зарубежные исследования в области топливных элементов активно развиваются на протяжении десятилетий. США реализуют долгосрочную стратегию развития водородной энергетики при поддержке Министерства энергетики (DOE) и международных партнёрств, таких как IPHE и IEA [2-4]. В 2024 году

Monika Singh с коллегами продемонстрировали возможность применения перспективных материалов на основе твёрдых оксидов в полупроводниковых топливных элементах, что открывает новые направления в этой области [5].

Существенный вклад в развитие данного научного направления вносят и научные работники Китая. В 2025 году Lin Liangliang и Chen Qixiu предложили стратегии повышения эффективности преобразования энергии в водородных автомобилях [7]. Gao Zhi с соавторами в 2024 году разработали метод внешней максимизации энергоэффективности, позволяющий снизить нагрузку на топливный элемент и повысить общую экономичность гибридной системы [8]. Li Yan, Yun Zhiting и Sun Qishen исследовали ключевые технологии водородных топливных элементов и их роль в экологизации транспорта [9]. Однако, несмотря на прогресс, доля Китая в мировом патентном портфеле по топливным элементам составляет лишь около 1%, что указывает на необходимость дальнейших исследований.

Настоящее исследование направлено на разработку адаптивной стратегии управления энергией для гибридной системы PEMFC/АКБ. Основная идея заключается в предотвращении работы топливного элемента в зонах низкой эффективности и поддержании зарядового состояния аккумулятора в безопасном диапазоне путём зонного управления с гистерезисом.

Методы и материалы исследования

Моделирование гибридной системы

Гибридная система включает протонно-обменный мембранный топливный элемент (PEMFC), литий-ионную аккумуляторную батарею, DC/DC-преобразователь, синхронный двигатель с постоянными магнитами (PMSM) и систему управления энергией. Моделирование выполнено в среде MATLAB/Simulink, что позволяет с высокой точностью воспроизводить динамические процессы в системе.

Для моделирования топливного элемента использован встроенный блок Fuel Cell Stack библиотеки Simulink. Модель учитывает электрохимические процессы, тепловые потери и динамику газораспределения. Напряжение холостого хода установлено на уровне 400 В, при токе 1 А напряжение снижается до 380 В. Номинальный ток – 285 А, номинальное напряжение – 300 В. Стек состоит из 400 ячеек. Ожидаемая эффективность – 57%, рабочая температура – 95°C. Состав топливной смеси (водород:кислород:водяной пар) задан в пропорции 95:21:1.

Аккумуляторная батарея смоделирована с помощью блока Battery (Simulink), который использует эквивалентную электрическую схему для описания процессов заряда и разряда. Используется литий-ионный аккумулятор номинальной ёмкостью 25 А·ч

и номинальным напряжением 288 В. Напряжение заряда – 335 В, внутреннее сопротивление – 0.2 Ом. Предельная мощность заряда/разряда – 25 кВт.

Поскольку топливный элемент обладает низкой динамической скоростью отклика, для стабилизации выходного напряжения применяется DC/DC-преобразователь. Модель состоит из двух компонентов: Bus DC controller (формирует сигналы управления скважностью) и DC/DC converter (преобразует входное напряжение в требуемое выходное).

Использован синхронный двигатель с постоянными магнитами (PMSM) с векторным управлением. Регулирование выходного напряжения инвертора осуществляется методом пространственно-векторной модуляции (SVPWM). Максимальная мощность двигателя – 100 кВт, максимальный крутящий момент – 256 Н·м, максимальная частота вращения – 12500 об/мин.

Динамика транспортного средства реализована с использованием библиотеки Vehicle Dynamics Blockset. Параметры автомобиля: полная масса – 1625 кг, площадь лобового сопротивления – 2.711 м², коэффициент аэродинамического сопротивления – 0.26, радиус колеса – 0.25 м, передаточное число главной передачи – 7.6, КПД трансмиссии – 0.9, коэффициент сопротивления качению – 0.014, коэффициент учёта вращающихся масс – 1.2, уклон дороги – 0°.

Адаптивная стратегия управления энергией

Основными задачами разработанной системы энергоменеджмента являются обеспечение мгновенной подачи мощности при разгоне за счёт аккумулятора; рекуперация энергии торможения; защита аккумулятора от перезаряда и глубокого разряда; предотвращение работы топливного элемента в зонах низкой эффективности; минимизация резких и частых колебаний выходной мощности топливного элемента.

В зависимости от зарядового состояния (State of Charge, SOC) аккумулятора выделены три зоны управления состоянием заряда (табл. 1).

Для предотвращения паразитных колебаний SOC на границах зон введён гистерезисный переход. При снижении SOC ниже 40% активируется режим заряда и сохраняется до достижения 40% при подъёме. При превышении SOC выше 80% активируется режим разряда и сохраняется до снижения до 80%.

Система управления энергией включает два основных модуля Battery Management System (BMS) и Power Management System (PMS).

Battery Management System (BMS) – контролирует SOC, ограничивает мощность заряда/разряда, предотвращает выход за допустимые пределы.

Power Management System (PMS) – на основе сигналов педали акселератора, скорости, крутящего

Таблица 1

Зонное управление состоянием заряда (SOC)

Зона	Диапазон SOC	Режим работы
Низкая	$\leq 40\%$	Запрет разряда АКБ, приоритет работы ТЭ
Средняя	40-80%	Балансировка, ТЭ работает в зоне max КПД
Высокая	$\geq 80\%$	Запрет заряда АКБ, приоритет разряда

момента и данных от BMS формирует целевой крутящий момент двигателя и опорный ток топливного элемента.

Результаты

Моделирование проводилось на городском ездовом цикле с частыми разгонами и торможениями. Параметры компонентов сведены в табл. 2.

Положение педали акселератора в процессе цикла изменялось от -0.8 до 0.8, что соответствует частым ускорениям и замедлениям. Скорость автомобиля колебалась в диапазоне 0-90 км/ч. При резком нажатии педали наблюдалась задержка роста скорости из-за инерции транспортного средства и сопротивления движению.

Максимальная потребляемая мощность системы достигала 105 кВт, при этом мощность топливного элемента ограничивалась 95 кВт, а дефицит

покрывался аккумулятором. На этапах замедления и холостого хода топливный элемент обеспечивал привод электродвигателя, а избыточная энергия направлялась на подзаряд АКБ. На установившихся режимах основную нагрузку нес топливный элемент, работая в зоне максимальной эффективности.

Ток DC/DC-преобразователя изменялся в диапазоне 0-350 А, обеспечивая стабильное преобразование напряжения между топливным элементом (300-450 В) и аккумулятором (200-350 В). SOC аккумулятора поддерживался в узких диапазонах 40-40.6% или 74-74.6% в зависимости от фазы цикла (рис. 1). Благодаря зонному управлению с гистерезисом удалось избежать перезаряда и глубокого разряда, что способствует продлению срока службы АКБ.

Таблица 2

Параметры компонентов гибридной системы

Компонент	Параметр	Значение
Транспортное средство	Масса, кг	1625
	Площадь лоб. сопротивления, м ²	2.711
	Коэфф. аэродин. сопротивления	0.26
Двигатель PMSM	Макс. мощность, кВт	100
	Макс. крутящий момент, Н·м	256
	Макс. частота вращения, об/мин	12500
Топливный элемент	Тип	PEMFC
	Ном. мощность, Вт	85500
	Ном. напряжение, В	300
Аккумулятор	Ном. ток, А	258
	Ном. емкость, А·ч	25
	Ном. напряжение, В	288
	SOCL / SOCH	40% / 80%

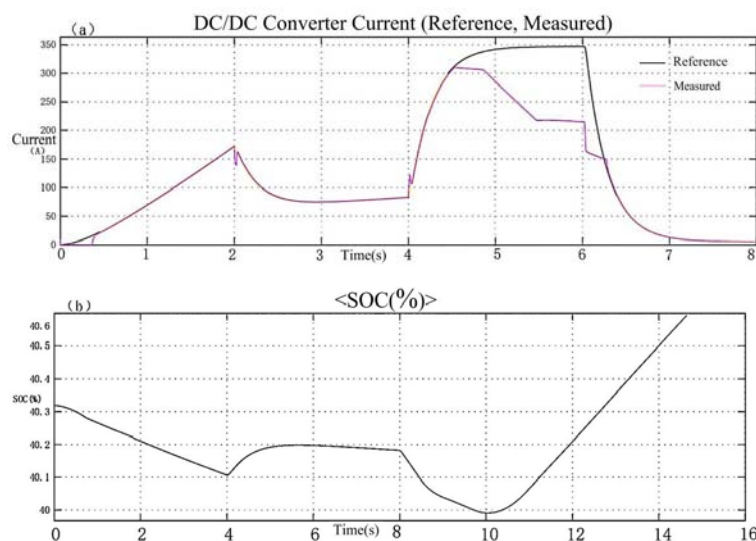


Рис. 1. Изменение состояния заряда аккумуляторной батареи (SOC) в процессе городского ездового цикла

Заключение

В работе представлена адаптивная стратегия энергоменеджмента для гибридной системы на основе топливного элемента PEMFC и литий-ионного аккумулятора, реализованная в среде MATLAB/Simulink.

Защита аккумулятора: зонное управление SOC с гистерезисом поддерживает SOC в диапазоне 40–80%, предотвращает перезаряд и глубокий разряд, что продлевает срок службы АКБ.

Повышение эффективности топливного элемента: адаптивное управление позволяет избежать работы топливного элемента в зонах низкой эффективности и поддерживать его преимущественно в

области максимального КПД.

Рациональное распределение мощности: в режимах максимальной нагрузки дефицит мощности покрывается аккумулятором, а при торможении осуществляется рекуперация энергии, что повышает общую топливную экономичность.

Перспективы дальнейших исследований связаны с уточнением моделей топливного элемента и аккумулятора на основе экспериментальных данных, внедрением методов машинного обучения для прогнозирования нагрузки, а также экспериментальной верификацией предложенной стратегии на реальном гибридном автомобиле.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Департамента образования провинции Хэйлуцзян (проект №2023-KYYWF-1135). Работа также выполнялась в рамках гос. задания Мин. науки и высшего образования РФ (тема «Лаборатория мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций с применением беспилотных авиационных систем», номер государственного учёта ЕГИСУ НИОКТР 1025091500035-5, шифр FEFF-2026-0005). Авторы выражают благодарность Хэйхэскому университету (Китай) и Сахалинскому государственному университету (Российская Федерация) за содействие в проведении исследований.

Список литературы

- Gao Z., Zhang J.Y., Jin D.H. Fuel Cell Hybrid System Design and Control Research. Tractor and Agricultural Transport Vehicle. 2024. V. 51. No. 6. Pp. 73-82. (in Chinese).
- Guan L., Li D.J., Ji S.S. Structural Regulation and Performance Enhancement of Carbon Based Supercapacitors. Materials. 2025. V. 27. Article 312034.
- Han E.F. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Modeling and Validation. Value Engineering. 2025. V. 44. No. 4. Pp. 5-8. (in Chinese).
- Haiyu G., Bifeng Y., Fei H.D. Optimization of Purge Strategy under Fuel Cell Startup Conditions Based on CFD Simulink Collaborative Simulation. Ionics. 2024. V. 30. No. 5. Pp. 2969-2987.
- Li Y., Yun Z.T., Sun Q.S. Research Status of Key Technologies of Hydrogen Fuel Cell Vehicles. Internal Combustion Engine and Parts. 2024. No. 7. Pp. 134-136. (in Chinese).
- Lin L.L., Chen Q.Y., Lyu J.P. Strategies for Improving Energy Conversion Efficiency of Hydrogen Fuel Cell Vehicles. Automotive Knowledge. 2025. V. 25. No. 3. Pp. 4-6. (in Chinese).
- Mou L., Zou Y., Jiang H.M. Research Status, Existing Problems and Future Development Trends of New Energy Vehicles. Auto Maintenance Technician. 2024. No. 16. Pp. 81-82. (in Chinese).
- Ren Z. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Air Supply System Modeling and Control. Chongqing: Chongqing University of Technology. 2024. (in Chinese).
- Singh M., Mittal A.P., Singh A.K. Heuristic Power Management of Hybrid Source Electric Vehicle Based on PV Battery PEMFC. International Journal of Hydrogen Energy. 2024. V. 8. Pp. 80.
- Singh M. Recent Advancement of Solid Oxide Fuel Cells towards Semiconductor Membrane Fuel Cells. Energy Materials. 2024. V. 40. Article 400012.
- Wang Y., Ruiz Diaz D.F., Chen K.S. Materials, Technological Status, and Fundamentals of PEM Fuel Cells: A Review. Materials Today. 2020. V. 38. Pp. 300122.
- Bi Y.S., Pei B.H., Yu P. Simulation Characteristic Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell. Henan Science and Technology. 2023. V. 42. No. 8. Pp. 50-56. (in Chinese).

References

- Gao Z., Zhang J.Y., Jin D.H. Fuel Cell Hybrid System Design and Control Research. Tractor and Agricultural Transport Vehicle. 2024. V. 51. No. 6. Pp. 73-82. (in Chinese).
- Guan L., Li D.J., Ji S.S. Structural Regulation and Performance Enhancement of Carbon Based Supercapacitors. Materials. 2025. V. 27. Article 312034.
- Han E.F. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Modeling and Validation. Value Engineering. 2025. V. 44. No. 4. Pp. 5-8. (in Chinese).
- Haiyu G., Bifeng Y., Fei H.D. Optimization of Purge Strategy under Fuel Cell Startup Conditions Based on CFD Simulink Collaborative Simulation. Ionics. 2024. V. 30. No. 5. Pp. 2969-2987.
- Li Y., Yun Z.T., Sun Q.S. Research Status of Key Technologies of Hydrogen Fuel Cell Vehicles. Internal Combustion Engine and Parts. 2024. No. 7. Pp. 134-136. (in Chinese).
- Lin L.L., Chen Q.Y., Lyu J.P. Strategies for Improving Energy Conversion Efficiency of Hydrogen Fuel Cell Vehicles. Automotive Knowledge. 2025. V. 25. No. 3. Pp. 4-6. (in Chinese).
- Mou L., Zou Y., Jiang H.M. Research Status, Existing Problems and Future Development Trends of New Energy Vehicles. Auto Maintenance Technician. 2024. No. 16. Pp. 81-82. (in Chinese).
- Ren Z. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Air Supply System Modeling and Control. Chongqing: Chongqing University of Technology. 2024. (in Chinese).
- Singh M., Mittal A.P., Singh A.K. Heuristic Power Management of Hybrid Source Electric Vehicle Based on PV Battery PEMFC. International Journal of Hydrogen Energy. 2024. V. 8. Pp. 80.

10. Singh M. Recent Advancement of Solid Oxide Fuel Cells towards Semiconductor Membrane Fuel Cells. Energy Materials. 2024. V. 40. Article 400012.
11. Wang Y., Ruiz Diaz D.F., Chen K.S. Materials, Technological Status, and Fundamentals of PEM Fuel Cells: A Review. Materials Today. 2020. V. 38. Pp. 300122.
12. Bi Y.S., Pei B.H., Yu P. Simulation Characteristic Analysis of Proton Exchange Membrane Fuel Cell. Henan Science and Technology. 2023. V. 42. No. 8. Pp. 50-56. (in Chinese).

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Чжан Цзин

преподаватель, Институт естественных наук, Хэйхэский университет, 164300, Хэйхэ, Китай

Сяо Гуйян

специалист, Народное правительство поселка Ванъян города Тели, 153000, Ичунь, Китай

Купцова Олеся Витальевна

кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Института естественных наук и техносферной безопасности, Сахалинский государственный университет, 693008, Южно-Сахалинск, Россия

Му Яннань

профессор, Институт естественных наук, Хэйхэский университет, 164300, Хэйхэ, Китай

Information about authors
Affiliations

Zhang Jing

Lecturer, Institute of Natural Sciences, Heihe University, 164300, Heihe, China

Xiao Guiyang

Specialist, Tieli City Wangyang Township People's Government, 153000, Yichun, China

Kuptsova Olesya Vitalievna

Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Life Safety, Institute of Natural Sciences and Technosphere Safety, Sakhalin State University, 693008, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Mu Yannan

Professor, Institute of Natural Sciences, Heihe University, 164300, Heihe, China

Поступила в редакцию 19.05.2026 г.

ОПТИМИЗАЦИЯ ТРАЕКТОРИИ БЕСПИЛОТНОГО НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

¹Чжан Цзин, ¹Бай Цзэцуй, ²Купцова О.В.

¹*Хэйхэский университет, 164300, Хэйхэ, Китай*

²*Сахалинский государственный университет, 693008, Южно-Сахалинск, Россия*

e-mail: korszuncevaolasy@gmail.com

В статье решается проблема низкой гладкости глобальных путей, генерируемых классическим алгоритмом A*, и склонности традиционного метода динамического окна (DWA) к попаданию в локальные оптимумы при обходе препятствий. Целью исследования является повышение эффективности, точности и стабильности планирования траектории для дифференциально-приводных беспилотных наземных транспортных средств. Предложена гибридная методика, в рамках которой алгоритм A* модифицирован за счет динамически взвешенной эвристической функции и штрафа за изменение курса. Метод DWA, в свою очередь, дополнен механизмом мультитраекторного прогнозирования (горизонты 1.5, 2.5, 3.5 с), шестимерной системой оценки (согласование с курсом, дистанция до препятствия, скорость, плавность, расстояние до цели, согласованность с глобальным путем) и динамической регулировкой весов. Эксперименты проведены в среде MATLAB на сетке 20×30 м (шаг 0.1 м) при плотности статических препятствий 20% и с двумя равномерно движущимися динамическими препятствиями (0.2 м/с). Научная новизна заключается в системной интеграции улучшенных версий обоих алгоритмов с учетом кинематических ограничений дифференциального привода. Вклад авторов: Бай Цзэцуй – разработка математических моделей и проведение вычислительных экспериментов; Чжан Цзин – адаптация алгоритмов и анализ данных; О.В. Купцова – постановка задачи и обобщение результатов. В статической среде гибридный алгоритм повысил эффективность навигации на 59.5%, точность слежения на 77.6% и стабильность слежения на 94.7% по сравнению с базовым вариантом (традиционный A* + традиционный DWA). В динамическом сценарии за пять независимых запусков не произошло ни одной коллизии, а эффективность навигации возросла на 53%. Разработанный алгоритм рекомендуется для геоинформационной поддержки беспилотных наземных транспортных средств в логистике и экологическом мониторинге.

Ключевые слова: геоинформационное моделирование, планирование пути, беспилотное наземное транспортное средство, алгоритм A*, метод динамического окна (DWA), гибридизация алгоритмов, MATLAB.

OPTIMIZATION OF UNMANNED GROUND VEHICLE TRAJECTORY PLANNING BASED

¹Zhang Jing, ¹Bai Zexu, ²Kuptsova O.V.

¹*Heihe University, 164300, Heihe, China*

²*Sakhalin State University, 693008, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

The paper addresses the problem of low smoothness of global paths generated by the traditional A* algorithm and the tendency of the traditional Dynamic Window Approach (DWA) to fall into local optima during obstacle avoidance. The aim of the study is to increase the efficiency, accuracy, and stability of trajectory planning for differential-drive unmanned ground vehicles. A fusion methodology is proposed, in which the A* algorithm is modified by introducing a dynamically weighted heuristic function and a heading angle penalty. The DWA is enhanced with a multi-trajectory prediction mechanism (1.5 s, 2.5 s, 3.5 s horizons), a six-dimensional evaluation system (heading, obstacle distance, velocity, smoothness, goal distance, path consistency), and dynamic weight adjustment. Experiments are conducted in MATLAB on a 20×30 m grid (0.1 m/cell) with 20% static obstacles and, separately, with two uniformly moving dynamic obstacles (0.2 m/s). The scientific novelty lies in the systematic integration of the improved versions of both algorithms while respecting the kinematic constraints of differential drive. Author contributions: Bai Zexu – development of mathematical models and computational experiments; Zhang Jing – algorithm adaptation and data analysis; Olesya V. Kuptsova – problem formulation and generalization of results. In the static environment, the fusion algorithm improved navigation efficiency by 59.5%, tracking accuracy by 77.6%, and tracking stability by 94.7% compared to the baseline (traditional A* + traditional DWA). In the dynamic scenario, no collisions occurred in any of the five runs, and navigation efficiency increased by 53%. The developed algorithm can be recommended for GIS-based support of unmanned ground vehicles in logistics and environmental monitoring.

Keywords: geographic information modelling, path planning, unmanned ground vehicle, A* algorithm, Dynamic Window Approach (DWA), algorithm fusion, MATLAB.

Введение

Применение беспилотных наземных транспортных средств (БНТС) в последнее десятилетие стремительно расширяется. Сферы использования включают складскую логистику, сельскохозяйствен-

ный мониторинг, патрулирование границ и научные наблюдения на охраняемых природных территориях. Ключевым требованием к автономному БНТС является способность планировать безопасную и эффективную траекторию. Эта задача обычно

разделяется на два уровня: глобальное (офлайн) планирование с использованием статической карты и локальное (онлайн) планирование, реагирующее на динамические препятствия [2,5,12].

Алгоритм A* (A-star) является одним из наиболее распространённых методов графового поиска, используемых для глобального планирования пути в статической среде [Hart et al., 1968]. Его популярность обусловлена сочетанием двух важнейших свойств: полноты (алгоритм всегда находит решение, если оно существует) и оптимальности (найденное решение является кратчайшим по стоимости при условии допустимости эвристики) [7]. Для локального планирования широко применяется метод динамического окна (DWA), предложенный Fox et al. [6], из-за его низкой вычислительной сложности и прямого учета скоростных ограничений. Однако оба метода имеют известные недостатки [1,4,13].

Оригинальный A* генерирует пути, состоящие из горизонтальных, вертикальных или диагональных сегментов, что приводит к появлению резких поворотов, невыполнимых для дифференциально-приводных платформ [3,9]. Классический DWA учитывает лишь короткий горизонт прогнозирования (обычно 2-3 с) и оценивает траектории по трем критериям, что часто вызывает застревание робота в тупиках или колебания при встрече с движущимися препятствиями [10,11].

Многочисленные исследования были направлены на улучшение этих алгоритмов. Yao et al. [14] объединили A* и DWA с коррекцией эвристической функции, но не модифицировали локальные критерии оценки. Guo et al. [8] ввели динамику транспортного средства в целевую функцию A*, однако их DWA по-прежнему использовал только три термина. Китайские исследователи также внесли вклад: Dong et al. [3] улучшили расширение окрестностей в A*, Wang и Ling [13] оптимизировали эвристическую функцию, Shen et al. [11] предложили адаптивные веса, Gong et al. [5] добавили ограничение безопасной дистанции, а Guo et al. [9] интегрировали ограничения уклона для пересеченной местности. Тем не менее, ни одна из этих работ не предложила системного решения, сочетающего улучшенный A* со штрафом за повороты и улучшенный DWA

с многокритериальной оценкой и динамической адаптацией весов для дифференциально-приводных БНТС.

Настоящее исследование заполняет этот пробел. Цели работы: (1) улучшить A* путем добавления динамического эвристического веса и штрафа за угол поворота, (2) улучшить DWA с помощью мультитракторного прогнозирования, шестимерной оценочной функции и динамической регулировки весов, (3) объединить оба улучшенных алгоритма в иерархическую схему. Экспериментальная верификация проведена в MATLAB для сценариев со статическими и динамическими препятствиями.

Методы и материалы исследования

Модель дифференциально-приводного транспортного средства

В качестве объекта исследования принята дифференциально-приводная платформа (два независимо приводимых колеса). Пусть V_L и V_R – линейные скорости левого и правого колес, а $L=0.5$ м – колея. Линейная скорость V и угловая скорость ω определяются как:

$$V = \frac{V_L + V_R}{2} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{V_L - V_R}{2L} \quad (2)$$

Движение подчинено ограничениям: максимальная линейная скорость $V_{\max}=1.0$ м/с, максимальная угловая скорость $\omega_{\max}=\pi/4$ рад/с, максимальное линейное ускорение $a_{\max}=0.5$ м/с², максимальное угловое ускорение $\alpha_{\max}=\pi/2$ рад/с². Минимальный радиус поворота составляет $R_{\min}=V_{\max}/\omega_{\max}=1.273$ м. Параметры сведены в табл. 1.

Моделирование рабочей среды: растровая карта

Используется растровое представление. Рабочее пространство представляет собой прямоугольник 20×30 м. Размер ячейки – 0.1 м, что дает сетку 200×300 ячеек. Свободные ячейки отмечены как 0, ячейки со статическими препятствиями – как 1. Плотность препятствий составляет ≈20%. Карта построена интерактивно в MATLAB и включает узкие

Таблица 1

Физические и кинематические параметры дифференциально-приводного ТС

Символ	Величина	Значение	Единица
L	Колея	0.5	м
r	Радиус колеса	0.1	м
$V_{\max}$	Максимальная линейная скорость	1.0	м/с
$\omega_{\max}$	Максимальная угловая скорость	$\pi/4$	рад/с
$a_{\max}$	Максимальное линейное ускорение	0.5	м/с ²
$R_{\min}$	Минимальный радиус поворота	1.273	м

проходы и беспорядочно расположенные блоки (рис. 1). Для динамических экспериментов добавлены два движущихся препятствия.

Улучшенный алгоритм глобального планирования A*

Алгоритм A* осуществляет поиск пути от начальной узла (start) до целевого узла (goal) на графе, которым в данном исследовании является растровая карта. Каждый узел n характеризуется координатами (x_n, y_n) и набором связей с соседними узлами. Основой алгоритма является оценочная функция $f(n)$, которая определяет приоритет обработки узлов:

$$f(n)=g(n)+h(n), \quad (3)$$

где $g(n)$ – фактическая стоимость пути от начального узла до текущего узла n (сумма стоимостей всех переходов вдоль построенного маршрута); $h(n)$ – эвристическая оценка стоимости пути от текущего узла n до целевого узла (прогноз оставшегося пути).

Ключевым элементом A* является эвристическая функция $h(n)$. От её выбора зависят как эффективность поиска (скорость), так и оптимальность результата. В настоящем исследовании в качестве эвристической функции используется евклидово расстояние (кратчайшее расстояние по прямой):

$$h(n)=\sqrt{(x_n - x_g)^2 + (y_n - y_g)^2} \quad (4)$$

где (x_n, y_n) – растровые координаты текущего узла n , а (x_g, y_g) – координаты целевой точки.

Традиционный алгоритм A* обладает двумя существенными недостатками: генерируемый путь состоит из отрезков, ориентированных по осям или диагоналям, что приводит к резким поворотам, и алгоритм не учитывает кинематические ограничения транспортного средства. Для устранения этих недостатков введено два улучшения.

Вместо фиксированного веса применяется коэффициент $\omega(n)$, убывающий при приближении к

цели. Модифицированная оценочная функция принимает вид:

$$f(n)=g(n)+\omega(n) \cdot h(n) \quad (5)$$

$$\omega(n) = 1 + \omega \max \left(1 - \frac{h(n)}{h_{start}} \right) \quad (6)$$

где $\omega \max=0.5$, а h_{start} – эвристическое значение от старта до цели (евклидово расстояние между начальной и целевой точками). Вдали от цели вес $\omega(n)$ больше, что усиливает направляющее действие эвристики и ускоряет поиск. При приближении к цели вес стремится к 1, сохраняя оптимальность пути. Данная модификация сокращает количество расширяемых узлов, не ухудшая качества найденного маршрута.

Для учёта кинематических ограничений дифференциально-приводного транспортного средства в стоимость пути вводится штраф за угол поворота. Пусть δ (в радианах) – угол между направлениями двух последовательных сегментов пути. Штрафная добавка рассчитывается как:

$$\text{penalty}=k \cdot |\delta| \quad (7)$$

с эмпирически подобранным коэффициентом $k=5$. Модифицированная стоимость перемещения становится равной:

$$f(n)=g(n)+\text{penalty} \quad (8)$$

Данный механизм побуждает алгоритм выбирать последовательности узлов, формирующие плавную траекторию с постепенным изменением направления, что принципиально важно для дифференциально-приводных платформ, имеющих минимальный радиус поворота.

В сетке размером 20×30 ячеек с плотностью статических препятствий 20% благодаря улучшенному алгоритму A* средняя длина глобального пути

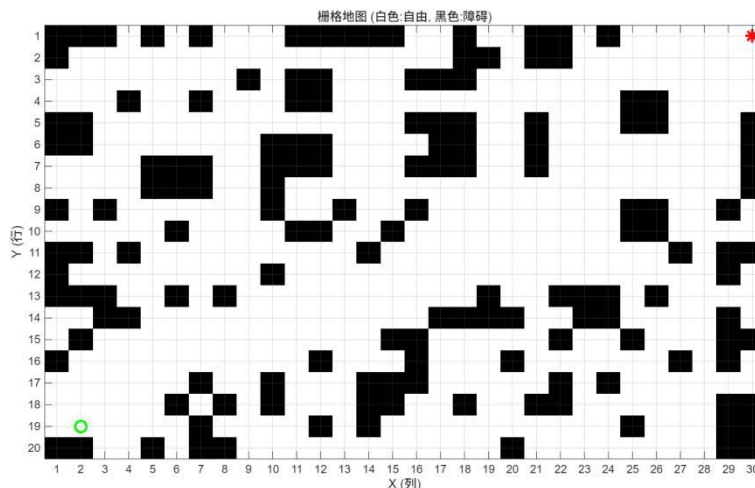


Рис. 1. Пример статической растровой карты

сократилась с 30.0 до 17.0 ячеек (сокращение на 43%); число смен направления движения уменьшилось с 15.0 до 6.0 (сокращение на 60%). На рис. 2 представлено сравнение траекторий, построенных традиционным и улучшенным алгоритмами A*.

Улучшенный метод локального планирования DWA

Классический метод динамического окна (Dynamic Window Approach, DWA) дискретизирует пары скоростей (V, ω) в динамическом окне, ограниченном ускорениями, прогнозирует траекторию на фиксированном горизонте T_{pred} и оценивает её как взвешенную сумму трех членов: согласования с направлением к цели, дистанции до ближайшего препятствия и величины поступательной скорости [6]. Однако классическая версия DWA склонна к застреванию в локальных минимумах и не учитывает долгосрочную согласованность с глобальным планом. В настоящей работе предложены три улучшения.

Вместо единственного горизонта прогнозирования (традиционно 3.0 с) используются три различных горизонта. $T_1=1.5$ с – для быстрой реакции на ближайшие препятствия. $T_2=2.5$ с – для баланса между оперативностью и дальновидностью. $T_3=3.5$ с – для учёта долгосрочной целевой ориентации.

Для каждой пары скоростей (V, ω) генерируются три траектории – по одной на каждый горизонт. Из всего множества сгенерированных траекторий выбирается та, которая набрала наибольшую суммарную оценку. Если на коротком горизонте траектория ведёт к столкновению, более длинный горизонт может обнаружить безопасный альтернативный путь.

Классическая трёхчленная оценочная функция не позволяет одновременно учитывать плавность движения, близость к глобальному пути и точное расстояние до конечной цели. В настоящем исследовании оценочная функция расширена до шести терминов [11]:

$$G = \alpha \cdot \text{heading} + \beta \cdot \text{dist} + \gamma \cdot \text{speed} + \delta \cdot \text{smooth} + \varepsilon \cdot \text{goal_dist} + \zeta \cdot \text{path_cons}$$

где heading – степень согласования конечной ориентации траектории с направлением на локальную подцель (в диапазоне $[0,1]$, где 1 – идеальное совпадение); dist – нормализованное минимальное расстояние от траектории до ближайшего статического или динамического препятствия (ограничено сверху безопасной дистанцией 1.0 м); speed – нормализованная поступательная скорость (поощряет более быстрое движение); smooth – интегральная мера плавности, обратная интегралу квадрата углового ускорения (штрафует резкие рыскания); goal_dist – евклидово расстояние от конечной точки траектории до глобальной цели (используется только для самого длинного горизонта ТЗТЗ); path_consistency – среднее евклидово отклонение точек траектории от глобального пути, построенного улучшенным A* (обеспечивает следование глобальному коридору).

Все шесть компонент нормализованы к интервалу $[0,1]$. Весовые коэффициенты подобраны эмпирически в ходе серии предварительных экспериментов и приведены в табл. 2.

Сумма всех весов равна 1.0, что обеспечивает

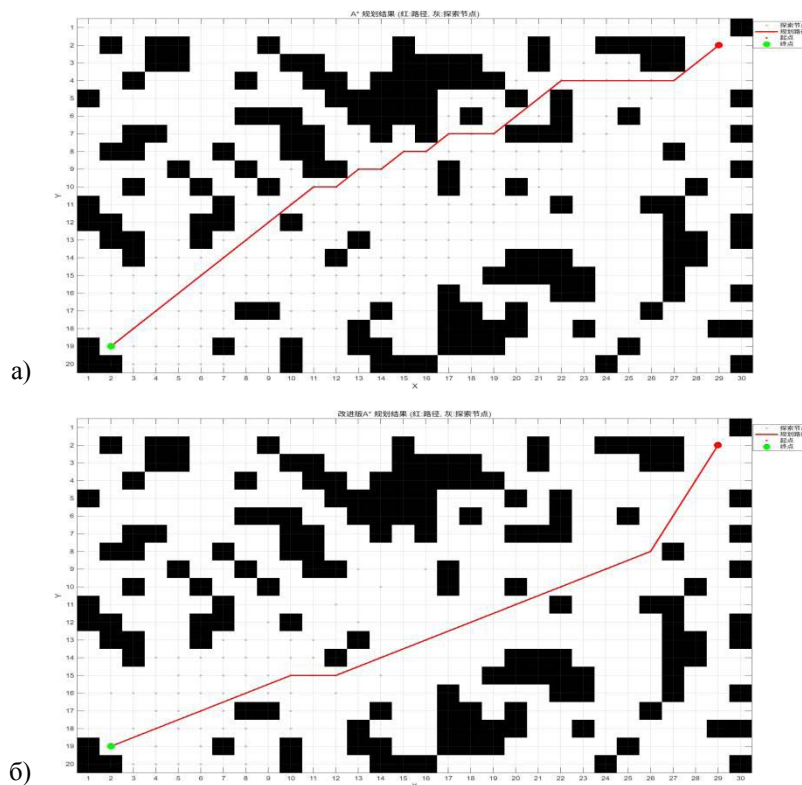


Рис. 2. Сравнение траекторий глобального планирования: а) – традиционный алгоритм A*; б) – улучшенный алгоритм A*

Таблица 2

Веса шестимерной системы оценки DWA

Параметр	heading	dist_obs	speed	smooth	goal_dist	path_consistency
Значение	0.25	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

сбалансированность критериев.

Фиксированные веса не позволяют адаптировать поведение робота к изменяющейся обстановке. Поэтому в данной работе реализован механизм динамической регулировки весов в зависимости от текущей ситуации [11]: при расстоянии до глобальной цели менее 1.0 м α и ε умножаются на 1.5; при расстоянии до препятствия менее 0.5 м β умножается на 2.0; при скорости ниже 0.3 м/с более 2 с γ умножается на 2.0. После адаптации веса перенормируются так, чтобы их сумма оставалась равной 1.0. Это сохраняет математическую корректность оценочной функции.

Общая схема гибридного алгоритма

Алгоритм работает циклически. Сначала улучшенный A* вычисляет глобальный путь от старта до цели. Затем на каждом шаге управления ($\Delta t = 0.1$ с) локальный планировщик (улучшенный DWA) определяет ближайшую точку на глобальном пути и выбирает точку с упреждением 2.0 м в качестве локальной подцели; DWA дискретизирует скорости, прогнозирует траектории (с тремя горизонтами), оценивает их и выбирает наилучшую скорость; вы-

бранная скорость применяется к модели, состояние обновляется; при приближении к подцели на <0.2 м выбирается следующая точка. Процесс повторяется до достижения глобальной цели (расстояние <0.2 м). Структурная схема предложенной системы представлена на рис. 3.

Результаты

Сравнивались четыре конфигурации: базовый вариант (традиционный A* + традиционный DWA); только A_imp + DWA; A + DWA_imp; предложенная конфигурация (A*_imp + DWA_imp). Каждая тестировалась пять раз на статической карте (рис. 1). Старт – (5.5), цель – (285.195). Результаты представлены в табл. 3, а примеры траекторий – на рис. 4-6.

Предложенный метод сократил число шагов до цели на 59.5% (243 против 600). Среднее отклонение от глобального пути уменьшилось на 77.6% (0.19 против 0.85). Число циклов без допустимой скорости снизилось с 3.8 до 0.2, что соответствует улучшению на 94.7%.

В динамическом сценарии (два препятствия, движущихся прямолинейно со скоростью 0.2 м/с) получены результаты, представленные в табл. 4 и на

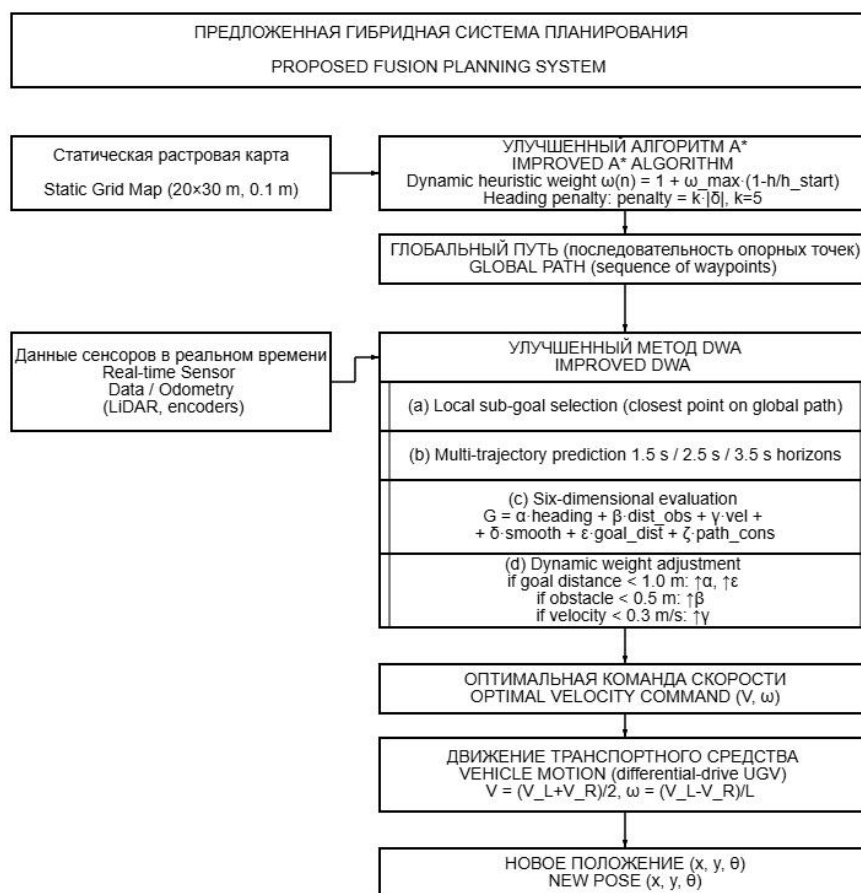


Рис. 3. Блок-схема гибридного алгоритма планирования траектории

Таблица 3

Сравнение производительности в статической среде (5 запусков, средние значения)

	Конфигурация	Длина глоб. пути (яч.)	Число поворотов	Шагов до цели	Кол-во недопуст. скоростей	Среднее отклонение (яч.)
1	Базовый (A*+DWA)	30.0	15.0	600	3.8	0.85
2	A*_imp + DWA	17.0	6.0	535	0.4	0.62
3	A* + DWA_imp	30.0	15.0	354	2.2	0.32
4	Предложенный (A*_imp + DWA_imp)	17.0	6.0	243	0.2	0.19

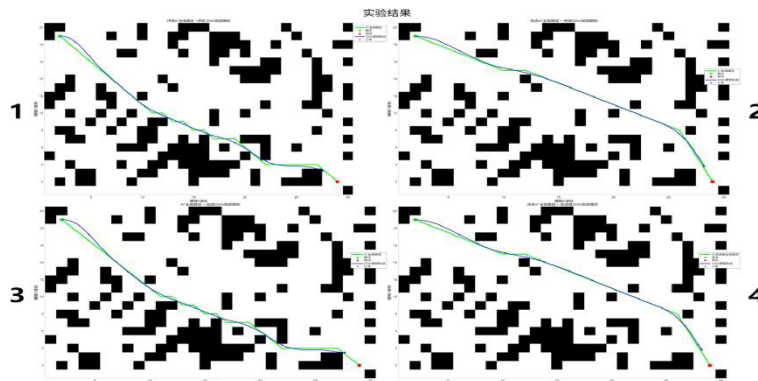


Рис. 4. Результат первой группы экспериментов со статическими препятствиями

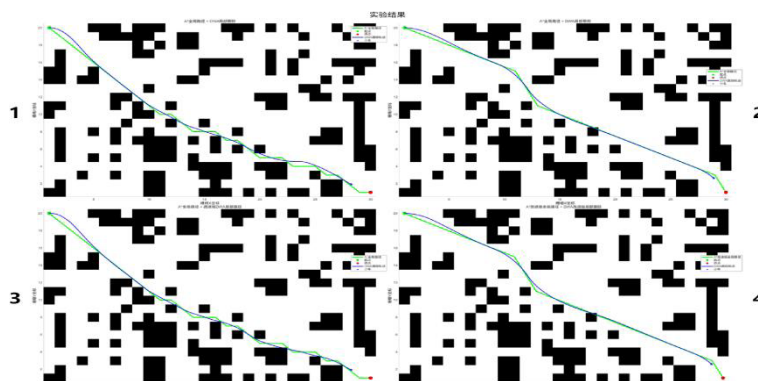


Рис. 5. Результат второй группы экспериментов



Рис. 6. Результат эксперимента со статическим препятствием третьей группы

рис. 7-9. Предложенный метод достиг нуля коллизий за пять запусков и повысил эффективность навигации на 53% (с 577 до 271 шага).

Полученные результаты демонстрируют преимущества предложенного подхода. Динамическое эвристическое взвешивание в A* ускоряет глобальное планирование без потери оптимальности, а штраф за поворот создает путь, учитывающий

минимальный радиус поворота. Мультитраекторный механизм в DWA обеспечивает устойчивость к ошибкам прогноза. Шестимерная система балансирует конфликтующие цели (безопасность, эффективность, комфорт, глобальное целеуказание). Динамическая регулировка весов автоматически смещает приоритеты в критических ситуациях.

Таблица 4

Сравнение производительности в среде с динамическими препятствиями (5 запусков, средние значения)

Конфигурация	Длина глоб. пути (яч.)	Число поворотов	Шагов до цели	Кол-во недопуст. скоростей	Эффект. маневров
Базовый (A*+DWA)	30.0	15.0	577	>150	12
A*_imp + DWA	17.0	6.0	562	50	12
A* + DWA_imp	30.0	15.0	377	3	30
Предложенный (A*_imp + DWA_imp)	17.0	6.0	271	45	32

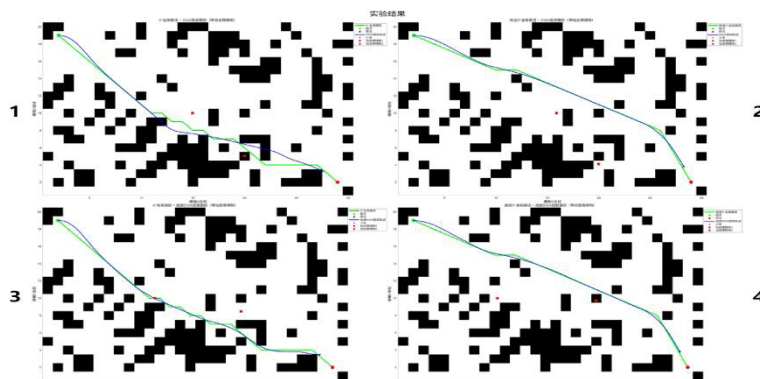


Рис. 7. Результаты первой группы экспериментов с динамическими препятствиями

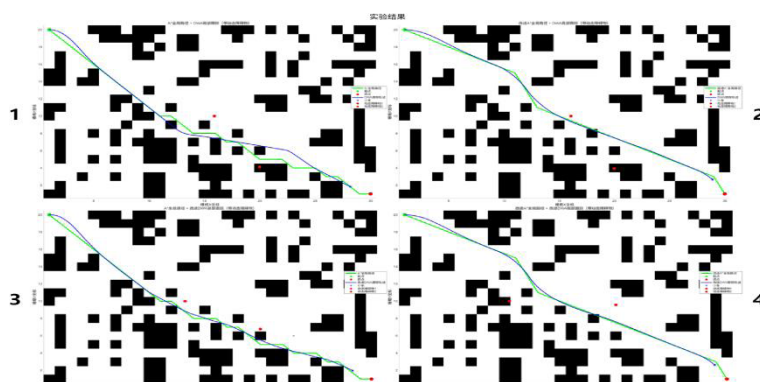


Рис. 8. Результаты второй группы экспериментов с динамическими препятствиями

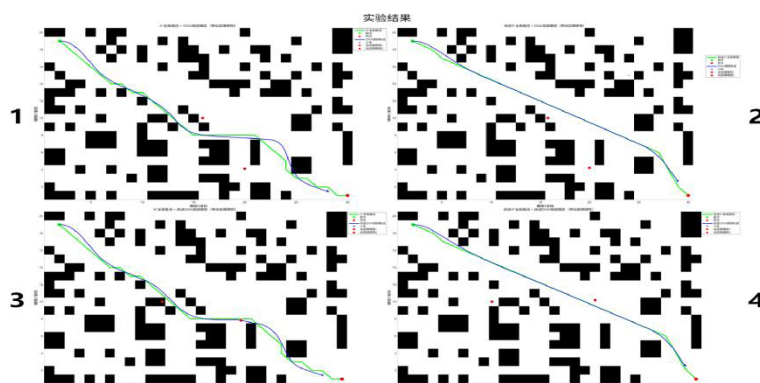


Рис. 9. Результаты третьей группы экспериментов с динамическими препятствиями

Заключение

В ходе выполнения настоящего исследования решена актуальная научно-техническая задача – повышение эффективности, точности и стабильности планирования траектории для беспилотных наземных транспортных средств с дифференциальным приводом. Основным научный результат заключается в разработке и экспериментальной верификации гибридного алгоритма, объединяюще-

го улучшенный метод глобального планирования A* и улучшенный метод локального планирования DWA. Улучшенный A* с динамической эвристикой ($\omega_{\max}=0.5$) и штрафом за изменение курса ($k=5$) сократил длину глобального пути на 42% и число поворотов на 60% на сетке 20×30 м с плотностью препятствий 20%.

Улучшенный DWA с мультитраекторным прогнозированием (1.5, 2.5, 3.5 с), шестимерной

оценкой и динамической регулировкой весов снизил число случаев отсутствия допустимой скорости с >150 до 3 в динамических сценах и полностью исключил коллизии за пять независимых запусков.

В среде со статическими препятствиями предложенный гибридный алгоритм повысил эффективность навигации на 59.5%, точность слежения за путем на 77.6% и стабильность слежения на 94.7% по сравнению с базовым вариантом.

В среде с динамическими препятствиями (два объекта, 0.2 м/с) предложенный алгоритм достиг

нуля коллизий и повысил эффективность навигации на 53% относительно базового варианта.

Предложенный метод вычислительно эффективен (среднее время цикла <0.05 с на тестовом оборудовании) и может быть реализован на встроенных управляющих платформах. Он рекомендуется для геоинформационной поддержки городских логистических роботов, сельскохозяйственных платформ мониторинга и патрульных машин на природных территориях.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема «Лаборатория мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций с применением беспилотных авиационных систем», номер государственного учета ЕГИСУ ННАОКР 1025091500035-5, шифр FEEF-2026-0005). Работа также поддержана грантом Департамента образования провинции Хэйлунцзян (проект № 2023-KYYWF-1135). Авторы выражают благодарность Сахалинскому государственному университету (Российская Федерация) и Хэйхэскому университету (Китай) за содействие в проведении исследований.

Список литературы

1. Dai J., Chai Y., Xiong P. Path Planning of Underground Robots via Improved A* and Dynamic Window Approach. Applied Sciences. 2025. V. 15. No. 13. Article 6953. DOI: 10.3390/app15136953.
2. Dong Y.W., Yang J.W., Zhang B.F. Mobile Robot Path Planning with Improved Neighbourhood Expansion A* Algorithm. Mechanical Design and Manufacturing. 2025. No. 1. Pp. 291-295. (in Chinese).
3. Fox D., Burgard W., Thrun S. The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance. IEEE Robotics & Automation Magazine. 1997. V. 4. No. 1. Pp. 23-33. DOI: 10.1109/100.580977.
4. Gong P., Li W.B., Ma Q.S. Path Planning of Unmanned Vehicles Based on Improved A* Algorithm. Modular Machine Tool and Automatic Processing Technology. 2023. No. 3. Pp. 17-24. (in Chinese).
5. Guo J.G., Yu J.Q., Feng C.Y. Global Path Planning for Robots on Uneven Terrain Based on Improved A* Algorithm. Computer Engineering and Applications. 2025. V. 61. No. 5. Pp. 309-322. (in Chinese).
6. Guo T., Sun Y., Liu Y. An Automated Guided Vehicle Path Planning Algorithm Based on Improved A* and Dynamic Window Approach Fusion. Applied Sciences. 2023. V. 13. No. 18. Article 10199. DOI: 10.3390/app131810199.
7. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968. V. 4. No. 2. Pp. 100-107. DOI: 10.1109/TSSC.1968.300136.
8. Liu J.J., Xue L.Q., Zhang H.J. Dynamic Path Planning for Robots by Integrating Improved A* and DWA Algorithms. Computer Engineering and Applications. 2021. V. 57. No. 15. Pp. 73-81. (in Chinese).
9. Shen D., Li L.Q., Cao M. Robot Path Planning Integrating Improved A* Algorithm and Dynamic Window Approach. Journal of Aerospace Early Warning Research. 2025. V. 39. No. 6. Pp. 445-451. (in Chinese).
10. Wang R.M., Ling M. Unmanned Vehicle Path Planning with Improved A* and DWA Fusion Algorithm. Modern Electronics Technology. 2025. V. 48. No. 14. Pp. 143-146. (in Chinese).
11. Yao M., Feng X., Deng H. A Dynamically Hybrid Path Planning and Obstacle Avoidance Algorithm for Mobile Robots Based on Improved A-star and Dynamic Windows Approach. Results in Engineering. 2026. V. 29. Article 108924. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.108924.
12. Zhang J.M., Dong F. Mobile Robot Path Planning Based on Gravity Search Algorithm Fused with DWA. Sensors and Microsystems. 2025. V. 44. No. 8. Pp. 110-119. (in Chinese).

References

1. Dai J., Chai Y., Xiong P. Path Planning of Underground Robots via Improved A* and Dynamic Window Approach. Applied Sciences. 2025. V. 15. No. 13. Article 6953. DOI: 10.3390/app15136953.
2. Dong Y.W., Yang J.W., Zhang B.F. Mobile Robot Path Planning with Improved Neighbourhood Expansion A* Algorithm. Mechanical Design and Manufacturing. 2025. No. 1. Pp. 291-295. (in Chinese).
3. Fox D., Burgard W., Thrun S. The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance. IEEE Robotics & Automation Magazine. 1997. V. 4. No. 1. Pp. 23-33. DOI: 10.1109/100.580977.
4. Gong P., Li W.B., Ma Q.S. Path Planning of Unmanned Vehicles Based on Improved A* Algorithm. Modular Machine Tool and Automatic Processing Technology. 2023. No. 3. Pp. 17-24. (in Chinese).
5. Guo J.G., Yu J.Q., Feng C.Y. Global Path Planning for Robots on Uneven Terrain Based on Improved A* Algorithm. Computer Engineering and Applications. 2025. V. 61. No. 5. Pp. 309-322. (in Chinese).
6. Guo T., Sun Y., Liu Y. An Automated Guided Vehicle Path Planning Algorithm Based on Improved A* and Dynamic Window Approach Fusion. Applied Sciences. 2023. V. 13. No. 18. Article 10199. DOI: 10.3390/app131810199.
7. Hart P.E., Nilsson N.J., Raphael B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968. V. 4. No. 2. Pp. 100-107. DOI: 10.1109/TSSC.1968.300136.
8. Liu J.J., Xue L.Q., Zhang H.J. Dynamic Path Planning for Robots by Integrating Improved A* and DWA Algorithms. Computer Engineering and Applications. 2021. V. 57. No. 15. Pp. 73-81. (in Chinese).
9. Shen D., Li L.Q., Cao M. Robot Path Planning Integrating Improved A* Algorithm and Dynamic Window Approach. Journal of Aerospace Early Warning Research. 2025. V. 39. No. 6. Pp. 445-451. (in Chinese).

10. Wang R.M., Ling M. Unmanned Vehicle Path Planning with Improved A* and DWA Fusion Algorithm. Modern Electronics Technology. 2025. V. 48. No. 14. Pp. 143-146. (in Chinese).
11. Yao M., Feng X., Deng H. A Dynamically Hybrid Path Planning and Obstacle Avoidance Algorithm for Mobile Robots Based on Improved A-star and Dynamic Windows Approach. Results in Engineering. 2026. V. 29. Article 108924. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.108924.
12. Zhang J.M., Dong F. Mobile Robot Path Planning Based on Gravity Search Algorithm Fused with DWA. Sensors and Microsystems. 2025. V. 44. No. 8. Pp. 110-119. (in Chinese).

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Чжан Цзин

преподаватель, Институт естественных наук, Хэйхэский университет, 164300, Хэйхэ, Китай

Бай Цзэцуй

аспирант, Хэйхэский университет, 164300, Хэйхэ, Китай

Купцова Олеся Витальевна

кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Института естественных наук и техносферной безопасности, Сахалинский государственный университет, 693008, Южно-Сахалинск, Россия

Information about authors
Affiliations

Zhang Jing

Lecturer, Institute of Natural Sciences, Heihe University, 164300, Heihe, China

Bai Zexu

Graduate Student, Heihe University, 164300, Heihe, China

Kuptsova Olesya Vitalievna

Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Life Safety, Institute of Natural Sciences and Technosphere Safety, Sakhalin State University, 693008, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Поступила в редакцию 22.05.2026 г.

КАТАЛОГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО КАВКАЗА (ТЕРРИТОРИЯ ДАГЕСТАНА И ПРИГРАНИЧНЫЕ ЗОНЫ) И АКВАТОРИИ СРЕДНЕГО КАСПИЯ ЗА I КВАРТАЛ 2026 г.

Магомедов Х.Д., Адилов З.А., Асекова З.О., Бжассо М.А., Гамидова А.М., Сагателова Е.Ю., Павличенко И.Н., Шахмарданова С.Г.

*Дагестанский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба Российской академии наук», 367025, Махачкала, Россия
e-mail: info@dbgsras.ru*

Рассматривается пространственно-временное распределение сейсмической активности на территории Дагестана и приграничных зон в I квартале 2026 г., приводятся карта эпицентров и каталог землетрясений в рассматриваемый период.

Ключевые слова: карта эпицентров, параметры гипоцентра, приграничная зона.

CATALOG OF EARTHQUAKES FOR NORTHEASTERN CAUCASUS (DAGESTAN AND BORDER AREAS) AND THE MIDDLE CASPIAN FOR THE I QUARTER 2026

Magomedov Kh.D., Adilov Z.A., Asekova Z.O., Bzhasso M.A., Gamidova A.M., Sagatelova E.Yu., Pavlichenko I.N., Shakhmardanova S.G.

Dagestan branch of Federal Research Center Unified Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, 367025, Makhachkala, Russia

The spatial-temporal distribution of seismic activity in the territory of Dagestan and the border zones in the I quarter of 2026 is considered, a map of epicenters and a catalog of earthquakes for the period under consideration.

Keywords: epicenter map, hypocenter parameters, border zone.

В первом квартале 2026 г. на территории Дагестана и приграничных зон повышенные значения плотности эпицентров и активности наблюдаются на территории Чеченской Республики, в очаговой зоне Дагестанского землетрясения 1970 г., вдоль Главного Кавказского хребта, в прибрежной акватории Каспийского моря южнее г. Махачкала. Наибольшее выделение сейсмической энергии наблюдается на территории Чеченской Республики.

Продолжается афтершоковый процесс Новокажентского землетрясения [1] 26 августа 2025 г.

В январе единственное землетрясение 10-го энергетического класса (ЭК) зарегистрировано на приграничной с Азербайджаном территории Грузии. Два землетрясения 9-го ЭК зарегистрированы на территории Чеченской Республики и одно землетрясение – в районе Чиркейского водохранилища.

В феврале одно землетрясение 10-го ЭК зарегистрировано на территории Чеченской Республики, три землетрясения 9-го ЭК – на территории Азербайджана и по одному землетрясению 9-го ЭК зарегистрированы в приграничном с Грузией районе Дагестана и в акватории Каспийского моря.

В марте по одному землетрясению 12-го и 9-го ЭК произошли на территории Чеченской Республики,

по одному землетрясению 10-го и 9-го ЭК зарегистрированы на территории Дагестана и Грузии, землетрясение 11-го ЭК и два землетрясения 9-го ЭК – в акватории Каспийского моря. Основные параметры гипоцентра землетрясения 12-го ЭК на территории Чеченской Республики, которое произошло 6 марта в 13^h44^m (по Гринвичу), определены региональной сетью сейсмических станций Дагестанского филиала ФИЦ ЕГС РАН: $\varphi=43.46^\circ\text{N}$; $\lambda=46.05^\circ\text{E}$; $K_p=11.96$; $M_s=4.42$; $h=87$ км [2]. Землетрясение было глубоким и на поверхности земли не ощущалось.

Карта эпицентров землетрясений в I квартале 2026 г. представлена на рис. 1. Энергетическая классификация землетрясений производится по шкале Т.Г. Раутиан [3].

Распределение землетрясений за I квартал 2026 г. по энергетическим классам приведено в таблице 1. График повторяемости землетрясений, полученный по этим данным, представлен на рис. 2. Как видно из рисунка, коэффициент повторяемости в рассматриваемый квартал равен $\gamma=0.49$, представителен седьмой ЭК.

Инструментальный каталог землетрясений рассматриваемой территории за I квартал 2026 г. [2] представлен в таблице 2.

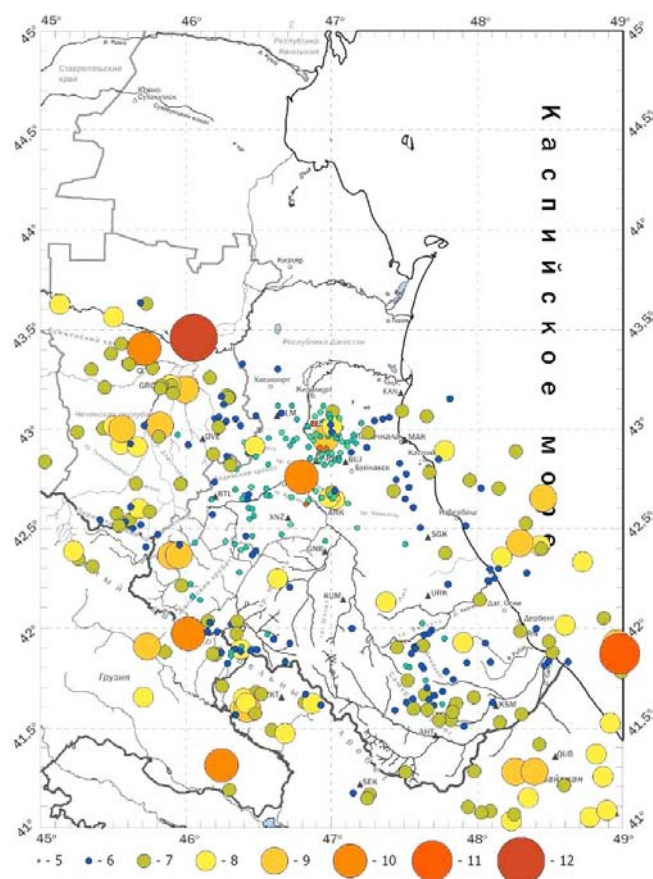


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений исследуемой территории за I квартал 2026 г.

Таблица 1

Распределение землетрясений по энергетическим классам и выделившаяся сейсмическая энергия за I квартал 2026 г.

K_p	5	6	7	8	9	10	11	12	ΣE , Дж
N	72	114	96	35	13	4	1	1	$1.16 \cdot 10^{12}$

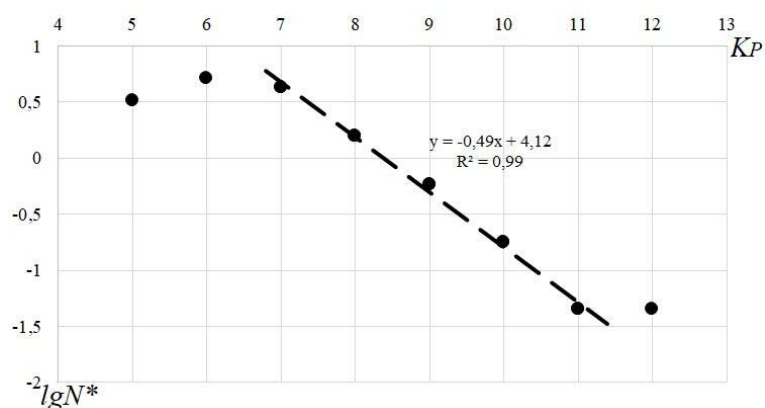


Рис. 2. График повторяемости за I квартал 2026 г.

Таблица 2

Инструментальный каталог землетрясений Дагестана и прилегающих районов за I квартал 2026 г.

№	Дата, д. м. г.	Время, t_0 ч-м-с	δt_0	Гипоцентр			V_p/V_s	K_p	M_s	n	Географический район
				φ , °N	λ , °E	h , км					
1	01.01.26	01-08-25.56	0.94	42.97	47.15	9	1.64	4.53	0.30	5	
2	01.01.26	02-59-28.85	-1.34	41.49	46.59	24	1.78	6.71	1.50	6	
3	01.01.26	08-06-44.56	-1.00	42.00	48.40	60	1.79	5.93	1.07	5	
4	01.01.26	11-44-03.32	0.86	43.16	46.30	18	1.69	7.41	1.90	8	
5	01.01.26	11-50-02.50	0.99	43.17	46.28	18	1.69	6.56	1.42	7	
6	02.01.26	12-20-34.79	-0.21	42.73	45.65	30	1.74	7.33	1.85	9	

Таблица 2 (Продолжение)

7	02.01.26	22-14-37.43	-4.59	40.07	46.93	7	1.85	8.68	2.60	3	
8	03.01.26	00-45-25.07	0.58	43.08	46.92	6	1.66	4.27	0.15	5	
9	03.01.26	01-47-01.09	0.32	43.06	46.88	6	1.69	4.30	0.17	5	
10	03.01.26	06-12-35.13	0.36	42.75	46.78	15	1.70	7.34	1.86	9	
11	04.01.26	02-00-21.44	1.48	42.01	48.60	15	1.66	7.59	2.00	5	
12	04.01.26	15-07-39.10	-1.87	41.74	47.52	24	1.87	6.79	1.55	5	
13	04.01.26	19-28-49.54	1.31	42.87	46.18	6	1.66	7.31	1.84	9	
14	04.01.26	23-29-38.05	-0.65	41.63	47.51	30	1.78	5.94	1.08	4	
15	04.01.26	23-30-09.12	-0.44	41.59	47.43	9	1.75	6.38	1.32	6	
16	05.01.26	00-09-55.96	-0.38	43.05	46.20	54	1.75	5.91	1.06	6	
17	05.01.26	00-19-17.58	-7.21	41.17	43.94	0	1.89	7.84	2.14	6	
18	05.01.26	00-34-48.51	-0.52	42.00	47.14	24	1.76	5.75	0.97	9	
19	05.01.26	04-20-19.37	-1.91	40.98	47.48	18	1.78	8.14	2.30	11	
20	05.01.26	04-51-51.93	-4.38	43.43	45.55	48	1.89	6.78	1.54	7	
21	05.01.26	04-52-55.24	-1.39	41.91	47.57	15	1.82	6.38	1.32	6	
22	05.01.26	11-29-25.58	0.14	43.20	45.99	6	1.72	8.50	2.50	9	Чеченская Республика
23	05.01.26	18-07-16.90	-0.20	42.36	45.96	6	1.74	6.92	1.62	8	
24	05.01.26	21-13-31.79	-1.32	41.37	48.82	9	1.78	7.92	2.18	6	
25	05.01.26	22-31-42.88	-0.96	40.94	47.32	48	1.77	7.30	1.83	4	
26	05.01.26	23-23-43.73	0.44	41.91	47.58	24	1.70	5.63	0.91	5	
27	06.01.26	13-18-08.91	-0.03	42.66	46.57	15	1.73	4.83	0.46	6	
28	06.01.26	18-14-27.15	-2.33	41.00	47.41	33	1.82	7.17	1.76	4	
29	06.01.26	19-42-16.42	0.19	41.63	46.81	60	1.72	7.26	1.81	9	
30	06.01.26	21-22-55.23	1.08	41.95	47.77	6	1.65	4.98	0.54	5	
31	07.01.26	09-01-08.36	-6.22	42.35	45.26	63	1.91	7.07	1.71	4	
32	07.01.26	20-16-45.51	-1.51	41.05	48.77	30	1.78	7.98	2.21	7	
33	07.01.26	23-08-12.32	-0.59	40.69	44.03	17	1.74	7.88	2.15	4	
34	08.01.26	02-12-36.24	-1.16	41.92	49.30	75	1.77	7.01	1.67	6	
35	08.01.26	03-37-55.88	0.01	41.60	47.81	9	1.73	6.04	1.13	4	
36	08.01.26	07-18-13.26	-3.26	42.67	42.95	11	1.78	8.80	2.67	7	
37	08.01.26	08-31-21.06	-4.17	42.71	44.25	45	1.84	8.16	2.31	7	
38	08.01.26	12-05-13.11	-2.81	40.12	45.93	5	1.79	8.54	2.52	6	
39	08.01.26	12-31-05.79	-0.10	42.54	45.61	30	1.73	6.53	1.41	6	
40	08.01.26	14-36-37.21	-1.65	41.25	48.86	60	1.78	8.34	2.41	7	
41	08.01.26	22-19-04.68	0.27	42.91	46.84	3	1.70	4.90	0.50	5	
42	09.01.26	02-01-10.65	0.56	41.87	47.55	6	1.69	5.91	1.06	5	
43	09.01.26	12-00-06.98	-0.59	42.92	45.55	9	1.75	8.26	2.36	8	
44	10.01.26	01-44-26.22	-1.84	42.39	46.38	9	1.98	4.26	0.15	4	
45	10.01.26	01-59-04.97	-1.22	42.02	46.31	6	1.81	6.18	1.21	6	
46	10.01.26	14-55-51.04	-0.66	40.65	48.37	30	1.75	11.14	3.97	6	
47	10.01.26	14-59-05.67	-0.98	40.74	48.63	48	1.76	8.79	2.66	5	
48	10.01.26	16-54-17.56	-2.22	40.67	48.72	48	1.80	8.39	2.44	5	
49	11.01.26	01-19-25.93	0.26	42.57	45.52	18	1.72	7.09	1.72	7	
50	11.01.26	05-06-07.23	0.03	41.53	48.15	24	1.74	6.65	1.47	5	
51	11.01.26	11-09-38.86	0.18	41.89	46.37	24	1.72	7.80	2.11	7	
52	11.01.26	16-59-05.52	-0.31	42.28	46.36	24	1.75	5.19	0.66	5	
53	11.01.26	18-39-05.62	-0.48	40.87	48.35	30	1.75	8.87	2.71	6	
54	11.01.26	18-54-15.01	-0.90	40.81	48.36	24	1.76	8.79	2.66	6	
55	11.01.26	19-22-51.60	-1.56	40.82	48.29	30	1.78	9.36	2.98	6	
56	11.01.26	21-08-20.03	-1.94	40.73	47.62	30	1.79	8.43	2.46	7	
57	11.01.26	21-11-22.85	-1.94	40.81	48.11	30	1.79	7.77	2.10	6	
58	11.01.26	21-41-45.71	-1.67	40.58	48.49	54	1.78	9.98	3.32	6	
59	11.01.26	23-07-33.18	-2.13	40.37	48.69	54	1.79	10.15	3.42	4	
60	11.01.26	23-25-35.75	-3.16	40.70	48.42	54	1.82	8.00	2.22	7	
61	11.01.26	23-51-15.71	-0.06	42.43	46.06	6	1.73	5.09	0.61	5	
62	11.01.26	23-54-03.30	-2.17	40.60	48.42	54	1.79	9.07	2.81	6	
63	12.01.26	00-17-01.61	-1.71	40.63	48.40	60	1.78	7.97	2.20	5	
64	12.01.26	00-23-11.57	-2.48	40.61	48.41	54	1.80	8.77	2.65	6	
65	12.01.26	00-25-07.08	-3.23	40.55	48.35	69	1.83	7.73	2.07	5	
66	12.01.26	13-00-20.17	-3.02	43.06	44.19	69	1.80	8.57	2.54	8	
67	12.01.26	17-37-09.83	-1.34	43.04	46.27	54	1.80	6.08	1.15	8	

Таблица 2 (Продолжение)

68	12.01.26	17-54-30.81	-1.00	41.59	46.43	9	1.77	6.83	1.57	7	
69	12.01.26	18-36-04.86	-0.52	41.81	47.51	24	1.77	5.35	0.75	5	
70	12.01.26	19-47-10.37	-1.38	41.80	47.53	24	1.86	5.36	0.76	5	
71	13.01.26	01-49-48.93	0.01	41.64	46.40	9	1.73	6.98	1.65	12	
72	13.01.26	02-42-12.21	0.08	42.51	47.92	15	1.73	6.23	1.24	11	
73	13.01.26	07-57-53.83	-1.61	43.56	45.50	18	1.78	7.61	2.01	8	
74	13.01.26	10-18-39.63	-0.51	42.91	45.66	18	1.75	7.71	2.06	9	
75	13.01.26	18-03-34.16	-1.03	41.21	48.60	9	1.77	7.15	1.75	6	
76	13.01.26	21-13-37.24	0.49	43.01	47.02	9	1.67	4.63	0.35	5	
77	13.01.26	21-28-53.40	0.59	42.98	47.00	6	1.66	5.81	1.00	5	
78	14.01.26	01-55-19.39	0.32	42.97	47.05	6	1.69	4.52	0.29	4	
79	14.01.26	01-58-58.01	-2.97	43.63	45.72	15	1.84	7.46	1.92	8	
80	15.01.26	00-13-13.17	-0.85	41.90	47.45	24	1.77	6.90	1.61	11	
81	15.01.26	02-56-24.26	-0.12	43.12	46.73	30	1.74	4.81	0.45	6	
82	15.01.26	04-22-51.17	0.01	43.02	46.37	3	1.73	5.60	0.89	8	
83	15.01.26	14-24-05.00	-0.71	42.95	46.96	6	1.77	8.59	2.55	13	Республика Дагестан
84	15.01.26	14-48-56.30	-3.33	39.98	48.55	1	1.79	8.42	2.46	6	
85	15.01.26	20-55-41.25	-4.70	40.24	50.12	13	1.82	9.35	2.97	5	
86	16.01.26	11-04-32.97	-1.27	42.84	45.03	63	1.76	7.21	1.78	5	
87	16.01.26	14-33-01.88	0.28	43.03	47.20	9	1.71	5.35	0.75	5	
88	16.01.26	15-59-35.09	0.96	43.38	45.48	63	1.70	7.24	1.80	7	
89	16.01.26	21-45-14.47	-0.29	43.01	47.03	9	1.77	4.87	0.48	5	
90	17.01.26	00-35-24.70	-0.77	41.83	48.62	75	1.76	6.37	1.32	4	
91	17.01.26	01-32-43.71	-1.05	42.96	46.97	9	1.87	4.61	0.34	4	
92	17.01.26	11-46-34.26	0.05	42.67	46.40	18	1.73	5.04	0.58	5	
93	17.01.26	17-30-50.22	-0.99	41.54	47.82	15	1.79	7.37	1.87	9	
94	17.01.26	17-33-04.83	-0.04	41.62	47.85	15	1.74	6.51	1.39	4	
95	18.01.26	01-46-16.12	-0.62	41.87	46.21	18	1.76	7.26	1.81	10	
96	18.01.26	03-08-24.37	-0.56	42.28	48.34	18	1.76	6.08	1.15	6	
97	18.01.26	03-25-18.38	1.32	43.06	47.65	18	1.67	6.72	1.51	8	
98	18.01.26	03-51-35.23	-2.16	40.79	48.44	30	1.80	8.42	2.46	6	
99	18.01.26	03-56-45.64	-2.02	40.56	48.32	54	1.78	10.85	3.80	7	
100	18.01.26	04-02-12.17	-2.43	40.62	48.53	69	1.80	8.00	2.22	5	
101	18.01.26	11-47-56.16	0.13	41.57	46.39	24	1.73	7.43	1.90	8	
102	18.01.26	20-56-54.74	-0.81	41.31	46.24	24	1.75	10.30	3.50	14	Грузия-Азербайджан
103	18.01.26	21-25-58.07	0.01	41.64	47.56	24	1.73	5.93	1.07	4	
104	18.01.26	21-41-39.93	-0.71	42.25	48.12	15	1.78	6.44	1.36	6	
105	18.01.26	22-08-02.52	-2.44	40.58	48.55	69	1.81	7.52	1.96	4	
106	19.01.26	03-59-37.82	-0.39	42.44	46.27	9	1.76	4.37	0.20	5	
107	19.01.26	04-06-20.73	-2.99	40.69	48.40	60	1.82	7.78	2.10	5	
108	19.01.26	04-23-45.48	-1.20	40.89	46.98	24	1.77	8.00	2.22	5	
109	19.01.26	07-28-08.36	0.13	42.85	46.85	3	1.71	4.61	0.34	6	
110	19.01.26	08-47-18.08	-0.48	42.30	48.09	3	1.76	6.39	1.33	6	
111	19.01.26	10-42-29.25	-1.03	42.60	45.67	60	1.77	7.83	2.13	8	
112	20.01.26	02-30-48.61	13.01	42.30	49.14	5	1.49	7.18	1.77	3	
113	20.01.26	04-18-42.28	-1.23	43.22	45.89	15	1.78	8.27	2.37	8	
114	20.01.26	15-03-30.32	-1.33	41.88	48.52	63	1.78	6.64	1.46	5	
115	20.01.26	19-02-57.06	-1.47	41.71	46.24	18	1.78	7.30	1.83	5	
116	20.01.26	21-53-15.93	-2.96	40.73	48.53	30	1.79	9.61	3.11	13	
117	20.01.26	22-04-07.21	0.63	42.03	47.62	24	1.68	5.00	0.55	4	
118	20.01.26	22-07-59.20	-3.96	40.86	48.27	39	1.86	6.59	1.44	4	
119	21.01.26	06-38-54.72	0.70	42.56	46.46	18	1.67	5.06	0.59	4	
120	21.01.26	14-11-07.96	4.70	42.52	45.69	9	1.56	5.96	1.09	4	
121	22.01.26	02-33-01.37	0.26	42.95	47.03	3	1.70	4.50	0.28	5	
122	22.01.26	07-45-34.45	-2.07	41.08	48.89	18	1.80	7.85	2.14	5	
123	22.01.26	11-23-34.05	0.34	42.21	45.97	9	1.72	6.84	1.58	10	
124	22.01.26	11-55-23.58	-0.45	41.60	46.37	18	1.75	7.68	2.04	11	
125	22.01.26	18-33-04.83	-0.40	41.61	46.40	18	1.74	7.49	1.94	11	
126	23.01.26	00-44-35.51	-1.45	43.02	45.82	15	1.78	9.02	2.79	14	Чеченская Республика
127	23.01.26	11-12-35.31	0.59	42.38	47.78	6	1.70	6.92	1.62	10	
128	23.01.26	20-27-50.38	0.25	42.88	46.43	6	1.71	5.79	0.99	5	

Таблица 2 (Продолжение)

129	23.01.26	22-33-53.67	-1.19	41.08	48.09	18	1.78	6.67	1.48	4	
130	24.01.26	07-24-10.61	-2.48	40.15	47.24	1	1.79	8.79	2.66	5	
131	24.01.26	15-49-10.70	-1.53	42.99	45.25	33	1.78	7.45	1.92	7	
132	24.01.26	15-53-06.51	-0.18	41.68	46.48	18	1.74	7.28	1.82	7	
133	24.01.26	18-43-28.79	-0.27	42.37	46.45	18	1.75	5.61	0.89	5	
134	24.01.26	18-47-15.07	-0.06	41.60	46.44	48	1.73	7.23	1.79	7	
135	24.01.26	21-45-42.56	-0.57	41.65	46.39	18	1.75	7.56	1.98	8	
136	24.01.26	23-58-34.81	-0.02	42.22	47.80	15	1.73	6.43	1.35	6	
137	25.01.26	09-09-55.37	-0.13	41.65	45.70	18	1.73	7.58	1.99	7	
138	25.01.26	10-52-50.15	-0.20	42.50	45.63	9	1.74	6.31	1.29	7	
139	25.01.26	11-11-34.56	0.54	42.39	46.48	18	1.69	5.90	1.06	7	
140	25.01.26	20-52-09.22	-3.69	40.95	48.85	30	1.82	9.73	3.18	9	
141	25.01.26	23-45-49.51	-0.24	41.89	46.20	18	1.74	4.97	0.54	5	
142	26.01.26	08-45-47.77	0.51	41.98	46.21	24	1.70	5.74	0.97	5	
143	26.01.26	11-19-11.02	-0.04	42.36	48.17	3	1.73	7.52	1.95	11	
144	26.01.26	11-32-18.52	0.76	42.67	46.55	9	1.66	4.71	0.40	6	
145	26.01.26	20-36-14.22	-0.50	42.62	46.82	6	1.82	3.32	-0.38	4	
146	26.01.26	22-03-01.27	1.25	42.96	46.92	6	1.59	5.23	0.68	5	
147	27.01.26	05-00-28.24	-0.14	42.03	46.35	6	1.74	6.99	1.66	13	
148	27.01.26	11-30-16.48	-0.34	41.88	45.85	15	1.74	7.11	1.73	11	
149	27.01.26	13-03-53.38	-0.62	42.41	48.43	9	1.75	7.76	2.09	13	
150	27.01.26	15-32-43.03	-0.12	41.58	47.83	9	1.76	6.86	1.59	9	
151	27.01.26	18-12-37.27	0.41	42.84	47.02	6	1.68	4.58	0.32	6	
152	28.01.26	03-40-53.01	-1.22	41.91	47.63	24	1.84	6.57	1.43	4	
153	28.01.26	04-26-23.97	-1.01	41.15	48.35	9	1.76	7.67	2.04	8	
154	28.01.26	09-57-19.29	-0.81	41.99	47.69	9	1.80	5.87	1.04	3	
155	28.01.26	11-21-29.23	0.80	42.46	46.45	60	1.66	4.83	0.46	5	
156	28.01.26	19-33-32.54	1.90	41.92	48.05	9	1.60	5.69	0.94	4	
157	28.01.26	19-56-48.54	-0.25	43.08	46.65	6	1.76	6.27	1.26	10	
158	29.01.26	01-49-40.12	-0.92	42.73	45.98	18	1.78	6.39	1.33	8	
159	29.01.26	01-51-44.39	0.55	42.72	45.96	24	1.70	6.59	1.44	9	
160	29.01.26	04-15-06.74	0.38	43.12	46.94	9	1.69	5.24	0.69	5	
161	29.01.26	04-15-59.83	-3.30	40.92	46.41	24	1.83	8.30	2.39	8	
162	29.01.26	16-27-00.72	-1.79	40.33	45.77	2	1.76	8.54	2.52	6	
163	29.01.26	18-02-36.09	-0.20	42.87	46.93	6	1.77	3.82	-0.10	4	
164	30.01.26	00-28-23.00	1.24	41.83	48.09	18	1.66	6.24	1.24	6	
165	30.01.26	02-06-58.87	-0.40	41.51	47.91	9	1.76	5.95	1.09	6	
166	30.01.26	10-33-33.95	-1.64	42.99	45.55	18	1.79	7.34	1.86	8	
167	30.01.26	13-58-14.04	0.35	42.65	46.42	9	1.70	5.55	0.86	9	
168	30.01.26	20-20-02.62	-1.36	42.54	45.41	9	1.79	5.93	1.07	6	
169	30.01.26	20-38-48.36	0.25	42.99	46.98	6	1.70	4.33	0.19	5	
170	30.01.26	21-27-55.29	0.32	41.58	46.40	18	1.72	7.97	2.21	14	
171	30.01.26	23-26-33.15	-0.54	42.71	46.45	24	1.79	3.90	-0.06	4	
172	31.01.26	00-22-28.05	-3.53	41.82	44.65	69	1.83	7.27	1.82	5	
173	31.01.26	00-32-22.91	-1.54	41.65	46.39	18	1.80	5.86	1.03	7	
174	31.01.26	01-58-29.37	-0.14	41.60	46.42	18	1.74	6.82	1.57	9	
175	31.01.26	02-52-22.17	0.16	41.47	46.68	24	1.72	7.63	2.01	9	
176	31.01.26	03-43-32.09	-0.42	42.96	46.57	15	1.77	5.01	0.56	10	
177	31.01.26	13-28-20.45	0.00	42.85	47.05	24	1.73	5.19	0.66	6	
178	31.01.26	17-25-27.71	-0.25	41.83	47.93	15	1.75	6.15	1.19	5	
179	31.01.26	19-24-44.97	0.46	41.97	47.67	24	1.70	5.61	0.90	6	
180	01.02.26	00-46-31.94	0.11	41.28	48.26	9	1.72	9.09	2.83	8	Азербайджан
181	01.02.26	05-36-23.66	0.86	41.90	46.33	18	1.69	6.09	1.16	6	
182	01.02.26	18-28-12.90	0.51	41.92	48.96	24	1.72	8.99	2.77	15	Каспийское море
183	02.02.26	03-04-49.18	0.43	42.46	46.41	3	1.70	5.55	0.86	9	
184	02.02.26	08-52-59.20	-0.86	43.04	47.29	3	1.78	6.33	1.30	7	
185	02.02.26	13-21-26.16	-0.89	43.09	47.48	6	1.78	6.73	1.51	6	
186	02.02.26	16-34-25.69	-0.83	43.31	45.77	9	1.77	6.96	1.65	5	
187	03.02.26	02-38-21.45	-0.14	43.05	47.35	6	1.74	5.81	1.00	5	
188	03.02.26	08-18-46.52	-2.94	40.81	48.46	30	1.82	7.68	2.04	5	
189	03.02.26	14-22-43.05	-2.80	41.83	49.41	63	1.79	8.47	2.48	12	

Таблица 2 (Продолжение)

190	03.02.26	23-01-13.34	-1.09	42.88	47.13	18	1.80	6.49	1.39	14	
191	04.02.26	00-49-47.26	-0.18	43.06	47.39	15	1.74	6.04	1.13	6	
192	04.02.26	07-37-26.87	-0.68	42.21	46.71	6	1.77	5.84	1.02	5	
193	04.02.26	10-32-03.66	4.72	42.84	44.04	54	1.64	8.25	2.36	8	
194	04.02.26	12-59-13.57	-1.47	39.80	47.37	50	1.76	9.24	2.91	4	
195	05.02.26	01-23-51.56	-0.71	42.93	46.40	30	1.79	4.28	0.15	6	
196	05.02.26	09-55-01.15	-3.04	43.21	45.44	30	1.84	7.24	1.80	11	
197	05.02.26	22-15-55.98	0.26	42.98	46.66	6	1.69	3.77	-0.13	4	
198	06.02.26	05-42-15.43	0.52	43.01	47.06	6	1.68	4.84	0.47	5	
199	06.02.26	11-06-48.58	-0.79	41.98	48.30	15	1.77	6.55	1.42	7	
200	06.02.26	12-37-34.61	-1.09	42.59	45.75	24	1.78	6.63	1.46	9	
201	06.02.26	12-37-34.61	-1.09	42.59	45.75	24	1.78	6.63	1.46	9	
202	06.02.26	12-41-23.29	-0.39	41.60	46.42	18	1.74	9.19	2.88	14	Азербайджан
203	06.02.26	18-17-39.87	0.51	41.88	46.24	15	1.71	5.94	1.08	7	
204	06.02.26	23-38-09.67	-1.84	41.19	46.30	54	1.79	6.64	1.46	5	
205	07.02.26	08-38-09.42	0.02	42.83	46.99	3	1.73	4.30	0.16	5	
206	07.02.26	13-17-00.98	0.16	41.67	47.64	3	1.72	6.88	1.60	5	
207	07.02.26	17-59-11.72	-1.42	42.61	45.62	24	1.80	6.41	1.34	8	
208	07.02.26	18-03-29.91	-1.57	42.53	45.58	24	1.80	6.24	1.25	8	
209	08.02.26	09-53-59.12	-0.85	41.62	46.87	18	1.76	7.52	1.96	15	
210	08.02.26	15-15-02.81	-1.58	41.28	47.98	15	1.79	7.12	1.73	9	
211	08.02.26	23-32-06.57	-1.35	43.63	45.68	9	1.77	6.43	1.35	10	
212	09.02.26	21-40-14.93	-0.25	43.30	46.63	18	1.74	5.98	1.10	10	
213	10.02.26	03-41-11.94	-0.34	41.67	46.51	18	1.74	6.92	1.62	8	
214	10.02.26	09-22-57.66	-0.34	42.96	45.81	30	1.74	7.28	1.82	9	
215	10.02.26	14-33-48.48	-0.52	42.25	46.63	33	1.76	8.37	2.43	14	
216	10.02.26	15-35-28.92	-1.07	41.67	46.82	48	1.80	6.08	1.15	3	
217	10.02.26	16-40-50.26	0.24	41.62	46.41	18	1.72	7.62	2.01	10	
218	10.02.26	22-00-48.39	-0.26	42.42	46.33	54	1.75	5.22	0.68	6	
219	11.02.26	00-56-23.47	-1.06	42.60	48.43	9	1.77	6.14	1.19	8	
220	11.02.26	01-26-19.45	1.00	42.70	46.34	9	1.66	5.27	0.70	10	
221	11.02.26	03-11-24.62	0.24	41.88	46.31	24	1.72	5.17	0.65	5	
222	11.02.26	05-14-47.84	0.12	41.90	46.45	9	1.72	5.49	0.83	5	
223	11.02.26	06-56-47.55	-0.07	41.97	46.56	6	1.74	5.32	0.73	5	
224	11.02.26	07-01-47.84	-0.03	42.90	46.96	6	1.73	3.04	-0.53	5	
225	11.02.26	07-38-34.32	0.51	41.89	46.44	6	1.70	5.56	0.86	5	
226	11.02.26	09-11-37.36	-0.63	42.14	46.09	6	1.77	5.30	0.72	4	
227	11.02.26	09-45-56.88	0.51	41.89	46.48	6	1.70	5.85	1.03	5	
228	11.02.26	11-41-46.34	0.32	42.16	46.04	6	1.71	5.45	0.80	5	
229	11.02.26	11-46-49.66	-0.22	42.03	46.07	18	1.74	5.75	0.97	5	
230	11.02.26	23-46-37.85	0.93	42.91	46.47	3	1.70	8.12	2.29	15	
231	12.02.26	00-37-09.51	-0.02	41.86	46.31	24	1.73	5.37	0.76	5	
232	12.02.26	08-50-27.46	-0.47	41.91	46.38	15	1.76	5.35	0.75	5	
233	12.02.26	09-51-14.32	-1.18	42.31	45.36	18	1.77	6.69	1.49	7	
234	12.02.26	13-54-55.65	-1.50	40.93	48.07	24	1.77	9.62	3.12	11	
235	12.02.26	14-17-07.31	-0.83	41.93	47.90	24	1.77	7.90	2.16	13	
236	12.02.26	14-19-40.60	-0.05	42.52	46.72	9	1.73	4.14	0.08	6	
237	12.02.26	22-37-53.85	-2.03	43.63	45.13	30	1.79	7.90	2.17	7	
238	13.02.26	00-27-46.81	2.38	43.26	46.16	6	1.63	6.78	1.54	10	
239	14.02.26	02-53-13.47	0.04	42.88	46.97	3	1.73	4.98	0.55	5	
240	14.02.26	06-02-24.65	-0.22	41.70	47.65	15	1.75	6.36	1.31	7	
241	14.02.26	14-17-14.93	-0.95	41.59	47.56	9	1.79	6.93	1.63	8	
242	14.02.26	20-14-09.17	-0.57	41.63	48.11	6	1.77	5.95	1.08	5	
243	15.02.26	00-39-55.60	0.21	42.93	47.16	6	1.72	4.93	0.52	9	
244	15.02.26	02-02-31.75	-1.19	43.22	45.90	33	1.78	6.64	1.47	9	
245	15.02.26	02-04-34.90	-0.73	41.80	47.63	60	1.79	6.24	1.24	4	
246	15.02.26	03-19-38.65	-0.43	43.04	46.94	6	1.78	4.79	0.44	5	
247	15.02.26	04-09-54.27	-1.12	41.16	47.26	69	1.78	6.98	1.66	5	
248	15.02.26	20-09-34.68	-0.17	41.17	47.15	24	1.74	6.34	1.30	3	
249	16.02.26	20-18-11.34	-0.94	41.52	48.91	15	1.77	7.58	1.99	5	
250	16.02.26	23-36-26.76	0.83	42.94	47.14	9	1.63	4.88	0.49	4	

Информационный раздел

Таблица 2 (Продолжение)

251	17.02.26	02-07-01.86	-4.70	40.17	45.91	6	1.83	8.68	2.60	6	
252	17.02.26	02-24-54.07	0.34	42.60	46.43	18	1.70	4.84	0.47	7	
253	17.02.26	14-24-06.10	0.74	42.93	47.10	9	1.65	5.29	0.72	6	
254	17.02.26	21-51-41.28	-0.52	42.63	47.11	9	1.79	3.97	-0.02	5	
255	17.02.26	22-55-44.71	-0.27	43.33	46.39	15	1.74	5.76	0.98	8	
256	18.02.26	06-14-38.39	-0.07	42.74	47.44	15	1.74	6.06	1.15	8	
257	18.02.26	06-30-44.36	0.29	42.69	47.42	15	1.71	6.67	1.48	9	
258	18.02.26	22-06-00.23	0.13	42.60	46.45	18	1.72	4.65	0.36	5	
259	19.02.26	03-32-25.86	1.13	43.09	47.01	15	1.66	6.78	1.55	9	
260	19.02.26	07-10-04.06	1.06	42.86	46.28	15	1.66	6.31	1.28	7	
261	19.02.26	16-59-41.76	1.66	43.16	46.29	6	1.66	6.78	1.54	8	
262	20.02.26	08-35-24.24	0.23	41.28	47.50	9	1.72	6.66	1.48	7	
263	20.02.26	08-53-59.70	-0.61	40.71	48.84	30	1.75	8.07	2.26	6	
264	20.02.26	21-22-13.37	-2.94	40.12	48.81	1	1.79	8.82	2.68	6	
265	20.02.26	23-01-42.91	-0.54	42.89	48.26	9	1.75	7.48	1.94	12	
266	21.02.26	01-14-06.61	0.96	42.73	46.19	6	1.68	5.74	0.96	8	
267	21.02.26	05-09-41.44	-5.75	37.47	49.89	35	1.78	11.15	3.97	13	
268	21.02.26	23-17-00.75	-0.38	41.81	48.46	75	1.75	5.86	1.03	3	
269	22.02.26	01-07-29.19	-4.72	40.19	49.40	34	1.81	10.73	3.74	13	
270	22.02.26	01-26-09.49	-3.11	40.05	48.58	5	1.79	8.11	2.28	6	
271	22.02.26	01-41-27.80	-3.94	40.25	48.43	2	1.83	8.04	2.25	4	
272	22.02.26	01-51-16.34	-3.81	40.06	48.84	32	1.80	8.50	2.50	12	
273	22.02.26	02-01-00.29	-1.77	42.05	48.87	39	1.78	7.45	1.92	10	
274	22.02.26	02-44-29.76	-2.66	40.62	48.35	48	1.81	6.94	1.64	4	
275	23.02.26	02-47-45.78	-0.62	42.36	45.89	6	1.76	8.86	2.70	14	Дагестан-Грузия
276	23.02.26	03-26-37.39	-0.77	42.97	45.94	24	1.77	5.46	0.81	6	
277	23.02.26	05-54-06.33	0.18	41.87	46.18	15	1.72	6.61	1.45	6	
278	23.02.26	08-28-43.85	-1.76	43.40	45.71	75	1.78	9.75	3.19	14	Чеченская Республика
279	23.02.26	09-14-04.86	0.52	42.64	46.84	3	1.65	4.49	0.27	5	
280	24.02.26	01-36-38.22	-0.57	41.88	46.37	24	1.76	6.49	1.38	7	
281	24.02.26	07-52-31.51	-1.07	41.28	48.39	18	1.78	8.75	2.64	6	Азербайджан
282	24.02.26	16-39-10.80	0.56	41.97	47.63	9	1.69	5.99	1.10	6	
283	24.02.26	21-11-36.76	-1.01	41.78	47.78	15	1.82	5.78	0.99	6	
284	24.02.26	21-20-07.19	0.30	42.65	46.38	18	1.70	5.20	0.67	7	
285	24.02.26	23-22-59.07	-1.07	41.57	48.30	60	1.77	7.47	1.93	11	
286	25.02.26	03-28-22.65	0.30	41.64	47.67	9	1.71	5.81	1.01	4	
287	25.02.26	06-25-13.97	-0.19	43.01	46.83	9	1.75	5.41	0.78	6	
288	25.02.26	23-14-12.45	1.06	42.93	44.65	33	1.70	9.09	2.83	8	
289	25.02.26	23-22-30.84	-1.48	42.94	44.90	30	1.77	7.25	1.80	5	
290	25.02.26	23-39-01.78	0.68	42.80	46.34	3	1.68	5.01	0.56	6	
291	25.02.26	23-50-33.26	0.32	42.90	44.70	54	1.72	8.09	2.27	8	
292	26.02.26	02-02-33.49	1.30	40.45	45.88	3	1.71	7.67	2.04	8	
293	26.02.26	02-36-11.90	-0.88	42.37	46.02	6	1.77	6.46	1.36	10	
294	26.02.26	06-36-29.53	0.84	42.92	46.71	9	1.65	4.74	0.41	6	
295	26.02.26	19-11-02.71	0.63	42.93	47.11	9	1.67	5.33	0.74	7	
296	26.02.26	22-36-56.06	-0.01	42.47	46.65	9	1.73	5.49	0.83	10	
297	27.02.26	00-06-16.30	-0.91	42.41	45.72	15	1.77	6.44	1.35	9	
298	27.02.26	01-25-31.81	0.36	42.51	45.54	48	1.72	6.69	1.50	9	
299	27.02.26	03-40-19.71	-1.19	41.83	48.49	48	1.80	5.98	1.10	3	
300	27.02.26	06-40-41.07	-0.04	42.42	47.50	3	1.73	5.44	0.80	5	
301	27.02.26	09-56-01.78	-3.02	43.33	45.60	18	1.83	6.94	1.64	8	
302	27.02.26	11-52-50.19	-4.53	40.67	48.17	45	1.83	11.77	4.32	15	
303	27.02.26	12-04-20.21	-1.90	40.58	48.64	48	1.77	8.36	2.42	8	
304	27.02.26	12-05-04.59	-4.37	40.46	48.23	54	1.83	9.14	2.85	14	
305	27.02.26	12-07-31.29	-2.26	40.62	48.52	30	1.79	8.56	2.53	5	
306	27.02.26	12-23-37.14	-3.41	40.67	48.46	33	1.83	7.73	2.07	5	
307	27.02.26	12-36-32.29	-3.90	40.63	48.71	30	1.81	8.39	2.44	12	
308	27.02.26	12-45-11.88	-4.12	40.47	48.49	69	1.82	8.49	2.49	11	
309	27.02.26	13-01-06.54	-4.59	40.81	48.60	18	1.83	8.08	2.26	10	
310	27.02.26	13-16-01.51	-1.46	40.36	48.59	69	1.77	8.11	2.28	4	
311	27.02.26	14-18-52.33	-3.06	40.58	48.42	45	1.81	8.27	2.37	5	

Таблица 2 (Продолжение)

312	27.02.26	14-29-46.99	-1.05	41.74	47.64	3	1.85	5.17	0.65	4	
313	27.02.26	14-43-12.01	-3.01	40.54	48.77	69	1.80	8.82	2.68	5	
314	27.02.26	14-55-19.64	1.29	40.12	47.50	69	1.70	8.61	2.56	4	
315	27.02.26	15-02-54.47	-2.23	40.47	48.44	1	1.80	7.79	2.11	3	
316	27.02.26	15-12-35.02	-3.82	40.50	48.64	69	1.82	8.98	2.77	12	
317	27.02.26	15-52-55.80	-2.92	40.58	49.13	5	1.80	8.25	2.36	4	
318	27.02.26	17-45-32.20	-2.94	40.52	48.54	48	1.80	8.01	2.23	6	
319	27.02.26	18-28-19.77	-2.14	40.34	48.45	1	1.79	7.89	2.16	4	
320	27.02.26	20-37-01.15	-2.77	40.39	48.33	69	1.79	8.64	2.58	10	
321	27.02.26	20-44-46.53	0.04	42.13	47.37	15	1.73	7.85	2.14	15	
322	27.02.26	22-01-16.61	-2.45	40.63	47.95	30	1.78	9.56	3.09	16	
323	27.02.26	22-47-18.18	-0.60	40.18	47.75	69	1.75	7.52	1.96	3	
324	27.02.26	22-56-21.57	-3.83	42.52	44.74	54	1.82	8.25	2.36	15	
325	27.02.26	23-28-22.29	-0.77	41.83	46.68	6	1.77	6.08	1.15	6	
326	27.02.26	23-38-37.83	-4.89	40.43	48.57	48	1.83	9.91	3.28	16	
327	27.02.26	23-51-40.37	-4.18	40.54	48.82	1	1.84	7.93	2.19	5	
328	28.02.26	02-34-49.79	-3.84	40.43	48.82	2	1.80	10.44	3.58	15	
329	28.02.26	04-31-33.26	-4.45	40.25	48.48	2	1.81	9.02	2.79	12	
330	28.02.26	06-24-18.18	-2.73	40.97	46.54	30	1.80	7.91	2.17	11	
331	28.02.26	18-36-26.79	-3.44	40.57	48.82	48	1.80	9.81	3.23	13	
332	28.02.26	18-42-32.92	-2.61	40.25	47.98	5	1.80	8.01	2.23	3	
333	28.02.26	19-23-25.77	-1.13	41.03	48.23	30	1.77	7.53	1.96	4	
334	28.02.26	20-14-24.17	-2.63	40.30	48.36	5	1.80	7.40	1.89	3	
335	01.03.26	00-37-26.18	-2.59	40.12	49.37	26	1.78	8.84	2.69	7	
336	01.03.26	01-01-11.36	-0.30	42.89	47.77	6	1.74	8.34	2.41	15	
337	01.03.26	02-19-45.69	-0.13	42.78	47.67	24	1.74	6.87	1.60	9	
338	01.03.26	02-23-35.13	-0.80	43.15	47.81	6	1.76	6.23	1.24	8	
339	01.03.26	06-00-00.50	-2.57	40.47	48.30	69	1.81	8.22	2.35	4	
340	01.03.26	08-45-44.44	-0.29	40.51	48.49	60	1.74	8.04	2.24	4	
341	01.03.26	11-44-05.03	-3.44	41.38	49.43	39	1.83	8.45	2.47	5	
342	01.03.26	21-42-34.93	-0.45	42.76	46.79	39	1.75	9.88	3.27	14	Республика Дагестан
343	02.03.26	12-52-08.20	0.81	42.37	45.95	18	1.69	8.55	2.53	8	Республика Дагестан
344	02.03.26	22-46-44.26	-2.40	41.92	49.00	30	1.81	7.52	1.96	8	
345	02.03.26	23-20-21.21	-2.59	40.49	48.39	54	1.79	9.21	2.89	8	
346	03.03.26	19-33-12.24	-2.08	42.33	48.72	9	1.81	7.81	2.12	10	
347	04.03.26	00-24-47.04	0.17	42.91	46.92	6	1.70	3.45	-0.30	5	
348	04.03.26	04-39-47.09	-1.25	42.53	48.33	15	1.78	7.01	1.67	10	
349	04.03.26	08-18-53.73	0.59	42.85	47.73	15	1.70	6.26	1.25	10	
350	04.03.26	17-51-54.20	-0.93	42.40	48.44	15	1.77	6.84	1.58	14	
351	04.03.26	19-53-57.49	-1.29	41.78	48.99	24	1.77	7.34	1.86	10	
352	04.03.26	20-49-52.98	0.00	43.05	46.76	6	1.73	4.63	0.35	6	
353	05.03.26	00-09-41.81	-0.95	43.02	46.88	18	1.86	3.20	-0.45	3	
354	05.03.26	23-34-41.79	-0.79	43.01	47.00	15	1.77	7.59	1.99	15	
355	06.03.26	01-16-57.53	0.06	43.02	46.99	6	1.73	6.42	1.34	14	
356	06.03.26	01-43-20.66	0.17	43.07	46.98	9	1.71	5.16	0.64	6	
357	06.03.26	02-07-41.92	-1.03	42.83	47.47	15	1.78	5.94	1.08	12	
358	06.03.26	02-13-49.87	0.34	42.61	47.56	24	1.71	6.00	1.11	11	
359	06.03.26	03-57-00.75	0.07	43.08	46.98	9	1.72	4.71	0.39	4	
360	06.03.26	05-52-46.58	0.50	42.94	46.74	9	1.67	4.68	0.38	3	
361	06.03.26	05-59-43.04	0.67	42.95	46.76	15	1.65	4.19	0.10	3	
362	06.03.26	07-33-50.78	-2.77	40.27	48.25	69	1.79	8.57	2.54	6	
363	06.03.26	08-32-32.16	-1.23	42.99	46.22	6	1.79	5.93	1.07	7	
364	06.03.26	11-51-33.80	-0.35	42.65	47.02	15	1.76	7.71	2.06	14	
365	06.03.26	12-00-36.98	-0.19	42.67	46.96	15	1.75	5.83	1.02	8	
366	06.03.26	13-04-12.20	-0.39	42.66	46.98	18	1.76	8.04	2.24	16	
367	06.03.26	13-44-26.34	-1.93	43.46	46.05	87	1.80	11.96	4.42	16	Чеченская Республика
368	06.03.26	16-56-12.05	-0.25	42.68	47.00	15	1.75	7.38	1.88	16	
369	06.03.26	17-35-56.84	-1.65	42.39	45.22	48	1.78	7.94	2.19	8	
370	07.03.26	00-40-26.63	-0.92	42.65	47.04	9	1.94	2.12	-1.04	4	
371	07.03.26	02-09-39.12	-0.07	42.67	46.99	9	1.74	4.10	0.06	6	
372	07.03.26	02-18-15.33	-0.62	41.66	47.71	30	1.78	5.67	0.93	6	

Таблица 2 (Продолжение)

373	07.03.26	03-05-55.91	-0.39	42.67	46.43	9	1.77	6.42	1.34	12	
374	07.03.26	06-37-50.18	0.01	42.65	47.00	3	1.73	3.99	0.00	5	
375	07.03.26	08-03-55.86	-0.16	42.84	46.92	3	1.77	4.19	0.11	5	
376	07.03.26	08-24-34.41	-0.81	41.97	46.34	9	1.77	6.98	1.65	11	
377	07.03.26	09-12-36.59	-1.26	42.93	45.62	9	1.78	6.35	1.31	8	
378	07.03.26	18-58-44.16	-0.68	41.42	48.42	6	1.76	6.97	1.65	6	
379	08.03.26	00-41-18.30	-0.01	42.50	47.17	6	1.73	4.08	0.05	5	
380	08.03.26	02-02-02.45	0.08	43.05	47.05	6	1.72	4.41	0.23	4	
381	08.03.26	02-43-17.26	-0.44	42.22	46.03	6	1.75	5.22	0.68	7	
382	08.03.26	03-03-48.62	-2.29	43.00	45.53	30	1.82	6.27	1.26	9	
383	08.03.26	08-06-44.40	-1.04	42.14	48.02	15	1.78	7.18	1.76	10	
384	08.03.26	20-52-19.54	-0.82	41.57	46.34	24	1.77	6.33	1.29	6	
385	08.03.26	22-48-10.38	0.02	42.94	47.07	9	1.73	4.33	0.18	6	
386	09.03.26	00-10-21.14	0.73	43.05	46.99	9	1.66	4.56	0.31	5	
387	09.03.26	02-08-45.12	-1.76	42.30	48.14	18	1.82	6.44	1.35	8	
388	09.03.26	02-14-17.02	-1.69	42.43	48.29	9	1.80	9.05	2.80	15	Каспийское море
389	09.03.26	14-36-55.57	-0.83	41.97	46.01	9	1.76	9.66	3.14	14	Грузия-Дагестан
390	10.03.26	03-53-01.38	-1.37	42.65	46.17	54	1.81	5.43	0.80	8	
391	10.03.26	08-36-43.24	-1.38	40.96	47.40	18	1.78	7.61	2.01	8	
392	10.03.26	11-51-12.31	0.06	42.74	47.95	6	1.73	6.52	1.40	12	
393	10.03.26	16-44-16.26	-0.78	42.04	46.15	9	1.77	7.09	1.72	14	
394	10.03.26	23-55-48.60	-0.19	42.77	47.51	6	1.74	6.27	1.26	15	
395	11.03.26	00-08-22.00	-5.85	40.08	49.87	2	1.84	8.29	2.38	5	
396	11.03.26	00-44-04.24	0.37	42.24	48.07	33	1.71	6.28	1.27	6	
397	11.03.26	01-22-38.33	-3.30	41.08	49.18	45	1.80	9.56	3.09	16	
398	11.03.26	05-14-17.16	-1.64	41.61	46.92	60	1.82	6.20	1.22	4	
399	11.03.26	12-49-35.98	-1.84	41.91	45.73	60	1.79	9.33	2.96	14	Грузия
400	11.03.26	14-40-33.43	-0.06	42.97	47.01	6	1.74	5.13	0.63	6	
401	11.03.26	17-14-38.14	-0.06	40.64	46.84	48	1.73	7.25	1.80	3	
402	12.03.26	01-07-03.89	-0.25	41.65	47.98	3	1.76	6.74	1.52	6	
403	12.03.26	16-14-46.97	-2.04	41.10	47.94	18	1.80	6.95	1.64	5	
404	12.03.26	22-59-56.40	-1.48	41.93	48.49	18	1.79	6.58	1.44	9	
405	13.03.26	00-13-29.25	-1.74	43.07	46.48	75	1.81	6.28	1.26	13	
406	13.03.26	01-12-52.15	-0.13	42.50	47.61	18	1.74	5.56	0.87	11	
407	13.03.26	03-49-36.55	0.25	41.94	46.60	6	1.72	5.53	0.85	7	
408	13.03.26	06-53-41.86	-0.67	40.95	47.88	18	1.76	7.14	1.74	4	
409	13.03.26	12-01-38.96	-0.17	42.65	47.50	18	1.74	6.44	1.35	9	
410	13.03.26	18-01-27.91	0.58	42.65	46.93	3	1.63	3.67	-0.18	5	
411	14.03.26	00-25-43.33	0.12	41.92	46.71	6	1.73	5.95	1.08	8	
412	14.03.26	14-52-45.40	0.21	42.91	47.24	24	1.71	6.49	1.38	9	
413	15.03.26	01-55-50.06	0.21	42.03	46.16	6	1.72	5.82	1.01	7	
414	15.03.26	02-52-00.56	0.76	41.98	46.14	18	1.69	5.85	1.03	6	
415	15.03.26	22-40-24.53	0.57	42.55	46.43	6	1.69	4.61	0.34	6	
416	16.03.26	02-15-58.72	-1.11	41.81	47.62	15	1.81	6.06	1.14	8	
417	16.03.26	03-56-56.68	0.26	42.69	46.89	6	1.69	3.52	-0.27	6	
418	16.03.26	06-18-14.06	-0.16	42.86	46.48	3	1.74	5.30	0.72	8	
419	16.03.26	15-00-18.44	-3.06	40.49	48.65	48	1.81	8.96	2.76	5	
420	16.03.26	21-00-40.04	-1.20	41.07	48.03	9	1.78	7.09	1.72	6	
421	17.03.26	10-06-45.70	1.06	43.01	44.70	54	1.71	7.46	1.92	7	
422	17.03.26	11-32-12.42	-0.48	42.47	45.80	18	1.75	6.45	1.36	9	
423	17.03.26	18-28-27.45	1.09	42.95	46.68	6	1.60	4.52	0.29	5	
424	17.03.26	19-57-57.20	0.18	40.84	48.48	60	1.72	7.27	1.82	4	
425	17.03.26	23-27-43.87	-0.28	41.15	47.24	48	1.74	7.44	1.91	6	
426	17.03.26	23-38-23.54	0.09	42.91	47.11	9	1.72	4.37	0.21	6	
427	18.03.26	05-15-13.76	0.04	42.82	46.56	15	1.73	5.38	0.76	7	
428	18.03.26	06-10-36.87	-2.44	41.87	48.98	30	1.80	10.50	3.61	16	Каспийское море
429	18.03.26	10-01-29.19	-0.30	41.61	47.70	6	1.77	5.85	1.03	3	
430	18.03.26	15-37-00.85	-1.22	42.98	47.25	6	1.79	6.68	1.49	11	
431	18.03.26	19-11-35.89	0.14	42.82	46.95	15	1.71	4.51	0.28	5	
432	18.03.26	22-07-04.89	-0.31	41.68	47.76	15	1.77	5.88	1.05	4	
433	18.03.26	22-08-47.55	0.51	42.88	47.06	6	1.66	4.41	0.23	5	

Таблица 2 (Продолжение)

434	19.03.26	00-29-07.01	-3.25	42.95	44.76	54	1.82	7.90	2.16	10	
435	19.03.26	02-39-12.67	-0.53	43.46	44.71	69	1.74	7.51	1.95	6	
436	19.03.26	04-14-08.47	0.33	42.69	47.02	15	1.71	5.89	1.05	12	
437	19.03.26	07-56-18.94	0.35	42.84	47.05	15	1.69	5.39	0.77	8	
438	19.03.26	16-55-47.60	-3.89	43.07	44.87	69	1.85	7.58	1.99	6	
439	20.03.26	00-00-27.91	-0.28	43.16	46.24	15	1.75	6.36	1.31	10	
440	20.03.26	01-20-09.49	-1.69	40.94	48.24	18	1.78	8.22	2.35	8	
441	20.03.26	01-21-34.31	-2.37	40.93	48.04	24	1.81	7.45	1.91	8	
442	20.03.26	10-53-57.29	0.45	42.98	47.00	6	1.68	5.77	0.98	6	
443	20.03.26	12-34-09.56	-0.21	42.66	47.01	9	1.76	3.89	-0.06	5	
444	20.03.26	14-12-44.10	0.02	42.96	46.85	6	1.72	4.38	0.21	4	
445	20.03.26	21-13-39.10	-3.45	40.42	48.03	69	1.83	7.57	1.98	4	
446	20.03.26	21-29-38.23	-1.24	40.98	48.43	18	1.78	7.65	2.03	5	
447	20.03.26	23-04-50.17	-0.33	41.74	47.83	24	1.75	6.00	1.11	6	
448	21.03.26	00-40-42.47	-2.21	43.22	45.83	18	1.83	6.84	1.58	9	
449	21.03.26	00-41-10.67	-3.46	43.21	45.82	30	1.91	6.85	1.58	8	
450	21.03.26	02-37-26.23	0.27	42.83	47.00	3	1.69	3.56	-0.25	5	
451	21.03.26	21-25-23.25	2.12	42.70	48.15	9	1.66	7.05	1.69	11	
452	21.03.26	23-40-59.86	-0.42	41.82	46.28	9	1.75	5.61	0.89	4	
453	22.03.26	00-11-29.27	0.11	42.94	46.88	6	1.72	3.69	-0.17	6	
454	22.03.26	02-29-00.82	-1.41	41.06	48.25	9	1.78	7.44	1.91	5	
455	22.03.26	05-31-55.88	-0.02	43.12	46.63	15	1.73	5.30	0.72	7	
456	22.03.26	09-25-10.08	-0.15	42.97	46.90	9	1.75	4.24	0.13	7	
457	22.03.26	14-05-10.55	-0.25	41.59	47.66	18	1.75	6.78	1.54	8	
458	22.03.26	15-14-03.87	-0.57	41.62	47.76	9	1.77	5.03	0.57	6	
459	23.03.26	06-32-58.50	-2.35	43.30	45.35	30	1.80	6.85	1.58	7	
460	24.03.26	05-55-04.87	-1.28	43.18	45.91	15	1.79	7.43	1.91	9	
461	24.03.26	10-10-02.51	-2.81	39.95	45.16	9	1.78	9.13	2.85	8	
462	24.03.26	21-39-44.60	-0.75	42.92	46.01	6	1.77	6.10	1.17	9	
463	25.03.26	00-18-53.81	-0.19	43.12	46.26	15	1.74	5.63	0.90	10	
464	25.03.26	10-04-57.17	0.33	42.70	46.55	6	1.70	4.85	0.47	6	
465	25.03.26	15-43-02.11	-2.01	40.18	46.46	69	1.78	8.01	2.23	5	
466	25.03.26	18-34-28.23	-0.28	42.42	45.95	9	1.75	5.97	1.10	8	
467	26.03.26	00-35-53.66	-2.00	42.41	46.41	54	1.87	5.20	0.66	9	
468	26.03.26	04-04-01.83	-3.89	40.48	48.65	60	1.82	8.30	2.39	8	
469	26.03.26	05-14-56.85	0.20	41.90	47.58	24	1.72	5.51	0.84	5	
470	26.03.26	06-37-46.70	-0.10	43.06	46.22	18	1.74	5.77	0.98	7	
471	26.03.26	13-15-29.84	-0.33	42.71	47.53	18	1.75	6.06	1.15	10	
472	26.03.26	20-33-01.64	-0.74	43.00	45.43	24	1.76	7.20	1.78	8	
473	26.03.26	20-58-01.98	-1.18	42.65	48.45	24	1.78	9.08	2.82	15	Каспийское море
474	26.03.26	21-24-15.80	-3.67	41.20	49.90	54	1.82	8.21	2.34	6	
475	26.03.26	21-56-07.70	-1.44	43.02	45.71	18	1.79	6.22	1.23	8	
476	26.03.26	23-29-40.55	-0.46	43.01	45.50	18	1.75	7.51	1.95	10	
477	27.03.26	00-11-21.25	1.02	43.00	45.56	9	1.70	8.74	2.63	11	Чеченская Республика
478	27.03.26	14-31-32.09	0.42	42.88	47.00	6	1.66	3.97	-0.01	5	
479	27.03.26	17-59-47.18	1.18	42.66	46.72	6	1.54	3.51	-0.27	4	
480	28.03.26	00-05-03.62	0.73	42.44	46.95	6	1.66	5.18	0.66	3	
481	28.03.26	02-07-41.23	0.32	42.57	46.18	3	1.71	6.07	1.15	7	
482	28.03.26	07-34-19.01	0.51	43.01	46.22	6	1.70	6.52	1.40	7	
483	29.03.26	02-40-40.78	0.23	40.69	46.44	39	1.72	7.40	1.89	3	
484	29.03.26	10-18-17.74	-1.53	41.57	46.47	24	1.80	7.21	1.79	7	
485	30.03.26	01-41-00.53	-2.53	40.75	48.31	30	1.79	7.67	2.04	7	
486	30.03.26	12-31-26.25	-0.11	43.05	46.34	45	1.74	5.99	1.11	3	
487	31.03.26	14-15-12.12	-0.62	42.82	46.30	24	1.78	7.42	1.90	9	
488	31.03.26	21-44-36.07	-0.36	41.54	47.74	24	1.76	6.81	1.56	5	
489	31.03.26	22-22-15.48	-0.84	42.70	48.02	24	1.77	6.24	1.25	5	

Обозначения основных параметров землетрясений:

t_0 – время в очаге землетрясения (по Гринвичу);
 δt_0 – погрешность определения времени в очаге землетрясения (с);

φ_0 – широта эпицентра (градус);

λ_0 – долгота эпицентра (градус);

h – глубина гипоцентра (км);

K_p – энергетический класс по Т.Г. Раутиан;

M – магнитуда (пересчитанная из класса K_p);

n – число сейсмостанций (по записям которых определялся эпицентр);

V_p / V_s – отношение скорости продольной волны

V_p к скорости поперечной волны V_s .

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

Список литературы

1. Магомедов Х.Д., Адиллов З.А., Асекова З.А., Гамидова А.М., Мусалаева З.А., Сагателова Е.Ю., Павличенко И.Н. Каталог землетрясений Северо-Восточного Кавказа (территория Дагестана и приграничные зоны) и акватории Среднего Каспия за III квартал 2025 г. // Мониторинг. Наука и технологии. 2025. №4(66). С. 114-125.
2. Адиллов З.А., Асекова З.О., Бжассо М.А., Гамидова А.М., Павличенко И.Н., Сагателова Е.Ю., Шахмарданова С.Г. Каталог (оригинал) землетрясений Дагестана за 2026 г. // Фонды ДФ ФИЦ ЕГС РАН. Махачкала. 2026.
3. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км. // Экспериментальная сейсмика. Труды ИФЗ АН СССР. №32(199). М.: Наука. 1964. С. 88-93.

References

1. Magomedov Kh.D., Adilov Z.A., Asekova Z.A., Gamidova A.M., Musalaeva Z.A., Sagatlova E.Yu., Pavlichenko I.N. Catalog of earthquakes of the North-Eastern Caucasus (Dagestan and border areas) and the Middle Caspian for the III quarter of 2025. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2025. No. 4(66). Pp. 114-125.
2. Adilov Z.A., Asekova Z.O., Bzhasso M.A., Gamidova A.M., Pavlichenko I.N., Sagatlova E.Yu., Shakhmardanova S.G. Catalog (original) of earthquakes in Dagestan for 2026. *Fondy DF FITS YEGS RAN*. Makhachkala. 2026.
3. Rautian T.G. On the determination of the energy of earthquakes at a distance of up to 3000 km. *Ekspierimental'naya seysmika. Trudy IFZ AN SSSR*. No. 32(199). Moscow: Nauka. 1964. Pp. 88-93.

**Сведения об авторах
Принадлежность к организации**

Магомедов Хаскил Джарулаевич

кандидат технических наук, директор Дагестанского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 367025, Махачкала, Россия

Адиллов Заракхман Ашуралиевич

заведующий отделом Дагестанского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 367025, Махачкала, Россия

Асекова Зульфия Османовна

инженер 1 категории Дагестанского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 367025, Махачкала, Россия

Бжассо Милена Алиловна

инженер Дагестанского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 367025, Махачкала, Россия

Гамидова Айшат Магомедовна

инженер 1 категории Дагестанского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 367025, Махачкала, Россия

Сагателова Елена Юрьевна

инженер 1 категории Дагестанского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 367025, Махачкала, Россия

**Information about authors
Affiliations**

Magomedov Khaskil Dzharulaevich

PhD in Technical Sciences, Director of Dagestan Branch of Federal Research Center United Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, 367025, Makhachkala, Russia

Adilov Zarakhman Ashuralievich

Head of Department, Dagestan Branch of Federal Research Center United Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, 367025, Makhachkala, Russia

Asekova Zulfia Osmanovna

Engineer of the Dagestan Branch of Federal Research Center United Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, 367025, Makhachkala, Russia

Bzhasso Milena Alilovna

Engineer of the Dagestan Branch of Federal Research Center United Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, 367025, Makhachkala, Russia

Gamidova Aishat Magomedovna

Engineer of the Dagestan Branch of Federal Research Center United Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, 367025, Makhachkala, Russia

Sagatlova Elena Yurevna

Engineer of the Dagestan Branch of Federal Research Center United Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, 367025, Makhachkala, Russia

Павличенко Ирина Николаевна

инженер 1 категории Дагестанского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 367025, Махачкала, Россия

Шахмарданова Сапият Гаджиевна

инженер Дагестанского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 367025, Махачкала, Россия

Pavlichenko Irina Nicolaevna

Engineer of the Dagestan Branch of Federal Research Center United Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, 367025, Makhachkala, Russia

Shakhmardanova Sapiyat Gadjievna

Engineer of the Departmenta, Dagestan Branch of Federal Research Center United Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, 367025, Makhachkala, Russia

Поступила в редакцию 30.04.2026 г.

Алиев Расул Магомедович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой нефтегазового дела, Дагестанский государственный технический университет

Атаев Загир Вагитович

кандидат географических наук, профессор кафедры физической географии Дагестанского государственного педагогического университета, профессор кафедры географии Дагестанского государственного университета

Батугин Андриан Сергеевич

доктор технических наук, доцент, Московский государственный горный университет МИСИС

Безруких Павел Павлович

доктор технических наук, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского

Братков Виталий Викторович

доктор географических наук, доцент, заведующий кафедрой географии Московского государственного университета геодезии и картографии

Булаева Нуржиган Маисовна

доктор технических наук, действительный член Академии информатизации образования, генеральный директор ООО «Центр сопряженного мониторинга окружающей среды и природных ресурсов»

Гайрабеков Ибрагим Гиланиевич

доктор технических наук, Член-корреспондент Академии наук Чеченской Республики, профессор, Грозненский государственный нефтяной технический университет имени академика М.Д. Миллионщикова

Галаганов Олег Николаевич

кандидат физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией «Спутниковых методов изучения геофизических процессов», Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Григорьев Борис Афанасьевич

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий базовой кафедрой «Исследование нефтегазовых пластовых систем» РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

Дадашев Мирали Нуралиевич

доктор технических наук, профессор кафедры физической и коллоидной химии РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

Демежко Дмитрий Юрьевич

доктор геолого-минералогических наук, Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН

Дубинин Евгений Павлович

доктор геолого-минералогических наук, член Российской академии естественных наук, заведующий сектором геодинамики, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Музей землеведения

Зуй Владимир Игнатьевич

доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры региональной геологии, Белорусский государственный университет

Илюшина Татьяна Владимировна

доктор географических наук, профессор, заведующая кафедрой землеустройства и кадастров, научный сотрудник учебно-исторического центра, Московский государственный университет геодезии и картографии

Aliyev Rasul Magomedovich

Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Oil and Gas Engineering, Dagestan State Technical University

Atayev Zagir Vagitovich

Candidate of Geography, Professor of the Department of Physical Geography of Dagestan State Pedagogical University, Professor of the Department of Geography of Dagestan State University

Batugin Andrian Sergeevich

Doctor of Engineering, Associate Professor, Moscow State Mining University MISIS

Bezrukih Pavel Pavlovich

Doctor of Engineering, Honored Worker of Science of the Russian Federation, G.M. Krzhizhanovskiy Power Engineering Institute

Bratkov Vitaliy Viktorovich

Doctor of Geography, Associate Professor, Head of the Geography Department of the Moscow State University of Geodesy and Cartography

Bulaeva Nurjagan Maisovna

Doctor of Engineering, Member of the Academy of Informatization of Education, General Director of the Center of the Dual Monitoring of Environment and Natural Resources

Gairabekov Ibragim Gilanievich

Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Chechen Republic, Professor, Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov

Galaganov Oleg Nikolaevich

Candidate of Physics and Mathematics, Chief Researcher, Head of the Laboratory of «Satellite Methods for Studying Geophysical Processes», O.Y. Schmidt Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences

Grigoryev Boris Afanas'evich

Doctor of Engineering, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Head of the Basic Department «Research of Oil and Gas Formation Systems», Gubkin Russian State University of Oil and Gas

Dadashev Mirali Nuralievich

Doctor of Engineering, Professor of the Department of Physical and Colloidal Chemistry of Gubkin Russian State University of Oil and Gas

Demezhko Dmitry Yurievich

Doctor of Geology and Mineralogy, Y.P. Bulashevich Institute of Geophysics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

Dubinina Evgeniy Pavlovich

Doctor of Geology and Mineralogy, Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Head of the Geodynamics Sector, Lomonosov Moscow State University, Museum of Earth Science

Zui Vladimir Ignatievich

Doctor of Geology and Mineralogy, Professor of the Department of Engineering Geology and Geophysics, Belarusian State University

Ilyushina Tatiana Vladimirovna

Doctor of Geography, Professor, Head of the Department of Land Management and Cadastre, Researcher at the Educational and Historical Center, Moscow State University of Geodesy and Cartography

Керимов Ибрагим Ахмедович

доктор физико-математических наук, профессор, академик Академии наук Чеченской Республики, вице-президент Академии наук Чеченской Республики, главный научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Малинников Василий Александрович

доктор технических наук, заведующий кафедрой космического мониторинга и экологии, Московский государственный университет геодезии и картографии

Мелкий Вячеслав Анатольевич

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Минцаев Магомед Шавалович

доктор технических наук, профессор, действительный член Академии наук Чеченской Республики, ректор Грозненского государственного нефтяного технического университета им. академика М.Д. Миллионщикова

Мухтаров Абдулвагаб Шариф оглы

доктор геолого-минералогических наук, руководитель отдела «Тепломассоперенос в недрах Земли», Институт геологии и геофизики Министерства Науки и Образования Азербайджанской Республики

Парфенюк Ольга Ивановна

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией теоретической геофизики, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук

Петрик Галина Георгиевна

кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, Объединенный институт высоких температур РАН

Петров Иван Васильевич

доктор экономических наук, профессор, заместитель декана факультета экономики и бизнеса, Финансовый университет при правительстве Российской Федерации

Утямышев Ильдар Рустамович

доктор технических наук, профессор Университета Западной Аттики (Афины, Греция), вице-президент Российской академии естественных наук

Федаш Анатолий Владимирович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геоэкологии Российского Государственного Университета нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

Хуторской Михаил Давыдович

доктор геолого-минералогических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, академик РАН, председатель Научного совета РАН по проблемам геотермии, заведующий лабораторией тепломассопереноса, Геологический Институт РАН

Шихнабиева Тамара Шихгасановна

доктор педагогических наук, ведущий научный сотрудник ФГБНУ Института стратегии развития образования РАО, действительный член Академии информатизации образования, профессор кафедры информатики ФГБОУ ВО «Российский экономический университет им. Г.В.Плеханова»

Kerimov Ibragim Akhmedovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of the Academy of Sciences of the Chechen Republic, Vice-President of the Academy of Sciences of the Chechen Republic, Chief Researcher of the O.Y. Schmidt Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences

Malinnikov Vasily Alexandrovich

Doctor of Engineering, Head of the Department of Space Monitoring and Ecology, Moscow State University of Geodesy and Cartography

Melkiy Vyacheslav Anatol'evich

Doctor of Engineering, Leading Researcher at the Laboratory of Volcanology and Volcano Hazard of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Mintsaeve Magomed Shavalovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Member of the Academy of Sciences of the Chechen Republic, Rector of the Grozny State Oil Technical University named after academician M.D. Millionshchikov

Mukhtarov Abdulgagab Sharif ogly

Doctor of Geology and Mineralogy, Head of the Department «Heat and Mass Transfer in the Bowels of the Earth», Institute of Geology and Geophysics of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan

Parfenyuk Olga Ivanovna

Doctor of Physics and Mathematics, Leading Researcher, Head of the Laboratory of Theoretical Geophysics, O.Y. Schmidt Institute of Earth Physics of the Russian Academy of Sciences

Petrik Galina Georgievna

Candidate of Physics and Mathematics, Leading Engineer, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences

Petrov Ivan Vasilievich

Doctor of Economics, Professor, Deputy Dean of the Faculty of Economics and Business, Financial University under the Government of the Russian Federation

Utyamyshev Ildar Rustamovich

Doctor of Engineering, Professor at the University of Western Attica (Athens, Greece), Vice-President of the Russian Academy of Natural Sciences

Fedash Anatoly Vladimirovich

Doctor of Engineering, Professor, Head of the Department of Geoecology, Russian State University of Oil and Gas (NRU) named after I.M. Gubkin

Khutorskoy Mikhail Davydovich

Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Honored Worker of Science RF, Academician of RANS, Chairman of the Scientific Council on geothermy, Head of the Heat and Mass Transfer Laboratory, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences

Shikhnaбиеva Tamara Shihgasanovna

Doctor of Education, Leading Researcher, Institute of Education Development Strategy, Russian Academy of Education (RAE), Member of the Academy of Informatization of Education, Professor on Department of Informatics of Plekhanov Russian University of Economics

Журнал «Мониторинг. Наука и технологии» (МНТ) печатает оригинальные работы (исследовательские и обзорные), не опубликованные ранее, представляющие результаты исследований и разработок в следующих областях знаний:

- науки о Земле,
- информационные системы и технологии в науке и образовании,
- физико-математические науки,
- технические науки.

Язык публикаций – русский, английский.

Объем статьи (заголовок, аннотация, ключевые слова (на русск. и англ. языках), текст, литература и References, сведения об авторах): минимальный – 6 стр., максимальный – 20 стр.

Статья оформляется в виде единого файла с подписями всех авторов на последней странице.

Скан-копии всех документов высылаются на электронный адрес редакции МНТ e-mail: mnt@csmos.ru.

Вся ответственность, связанная с неправомерным использованием объектов интеллектуальной собственности, лежит на авторах рукописи.

Статьи публикуются на коммерческой основе.

Рукописи, не соответствующие изложенным требованиям, к рассмотрению не принимаются.

Редколлегия не вступает в переписку с авторами по поводу отклоненных работ.

Адрес для представления материалов:

e-mail: monitoringST@mail.ru, mnt@csmos.ru

Тел.: (8-928) 962-32-60

Почтовый адрес: 367027, Респ. Дагестан, г. Махачкала, ул. Селиваньева, 2

Главному редактору журнала «МНТ» Булаевой Нуржаган Маисовне

© «Мониторинг. Наука и Технологии», 2026

Номер подписан в печать 25.06.2026 г.

Отпечатано в ООО «ЦСМОСипР»

Адрес издателя/типографии: 367027, РД, г. Махачкала, ул. Селивантьева, 2

Цена свободная. Тираж 350

Заказ №2