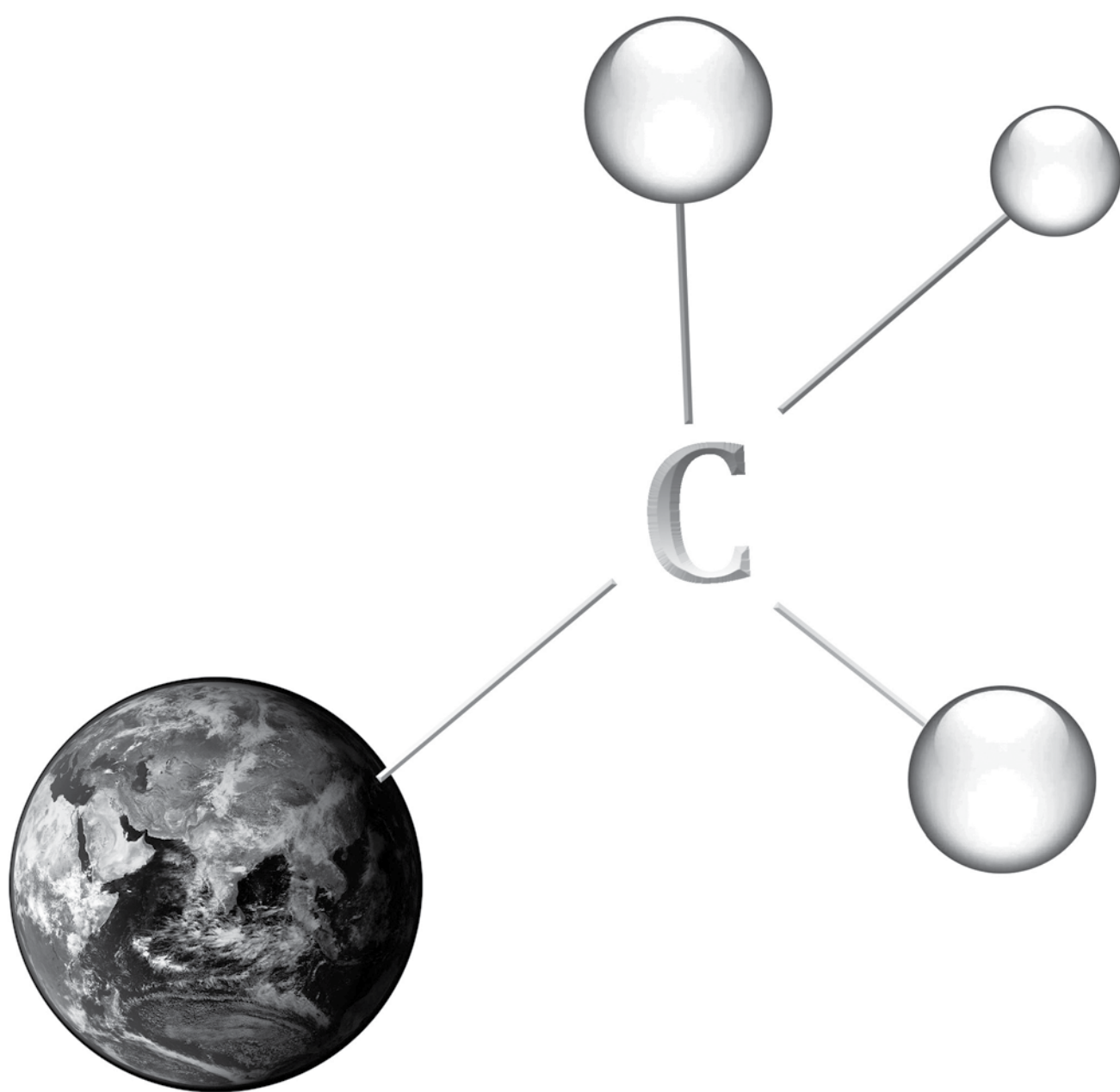


НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 2076-7358

МОНИТОРИНГ

наука и технологии



№ 3(69) 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 25.09.2026 г.

Отпечатано в ООО «ЦСМОСиПР»

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

Цена свободная. Тираж 350

Заказ №3

«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 25.09.2026

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 №3

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ 1. Науки о Земле	6
<i>Парфенюк О.И.</i> Возможность осуществления крупных надвигов и тектонические напряжения при внутриконтинентальном надвиге	6
<i>Сидоров М.Д.</i> Объемная модель раздробленности земной коры в бассейне реки Козыревка (Камчатка)	14
<i>Столяров В.М., Лепехин П.П., Груздев В.С., Морковкин Г.Г., Кочетов Я.С.</i> Зонирование территории по уровню эколого-экономических рисков деградации земель от промышленных источников в Пермском крае.	25
<i>Лепехин П.П., Мурашева А.А., Черкашина Е.В., Груздев В.С., Столяров В.М.</i> Оптимизация информационного обеспечения использования земель на трансграничных территориях: вопросы землеустройства и кадастра (на примере российско-казахстанского приграничья)	32
<i>Коробкова Е.И.</i> Анализ свойств текстурных признаков Харалика и примеры их использования для тематического дешифрирования космических изображений	44
<i>Фам Данг Хиен.</i> Сравнение источников спутниковых данных при классификации наземного покрова и мониторинге городских зеленых пространств (на примере Тхьюнгуена, г. Хайфон, Вьетнам)	57
РАЗДЕЛ 2. Информационные системы и технологии в науке и образовании	68
<i>Атаманов С.А., Горева А.Ю.</i> Применение искусственного интеллекта в анализе пространственных данных в кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности	68
<i>Ихсанова Э.А., Айдарбекова Д.Р.</i> Автоматизированный мониторинг охранных зон магистральных трубопроводов для выявления вмешательства третьих лиц	75
<i>Лоссов К.И.</i> Организация иерархического доступа к данным ГИС с помощью элементов объединяемой подгруппы амальгамы	80
<i>Шаповалов Д.А., Джалилов М.Б., Лукьянова Т.С., Груздев В.С., Хуторова А.О.</i> Современные технологии дистанционного зондирования в мониторинге мелиорированных агроландшафтов: анализ возможностей для рисовых систем Юга России	87
РАЗДЕЛ 3. Технические науки	93
<i>Литвиненко А.А., Ваньков Ю.В.</i> Влияние утечек и межконтурных перетоков на температурные характеристики теплообменного аппарата для диагностики его состояния	93
<i>Набиуллина М.Ф., Мингалева Г.Р.</i> Влияние условий эксплуатации на эффективность гибридной электростанции, работающей в составе сельскохозяйственного энергетического комплекса	101
<i>Пономарев Р.А., Ваньков Ю.В., Бусаров А.В.</i> Техничко-экономическая оценка кассетного аккумулятора тепла фазового перехода в индивидуальном тепловом пункте	109
РАЗДЕЛ 4. Информационный раздел	114
<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 II квартал 2026 г.	114
Информация о редакционном совете	127
Правила для авторов	129

CONTENTS

SECTION 1. Sciences about Earth	6
<i>Parphenuk O.I.</i> Possibility of large thrusts origin and tectonic stresses of intracontinental c collisional orogens ...	6
<i>Sidorov M.D.</i> Volumetric model of crustal breakup in the Kozyrevka river basin (Kamchatka)	14
<i>Stolyarov V.M., Lepekhin P.P., Gruzdev V.S., Morkovkin G.G., Kochetov Ya.S.</i> Territory zoning by the level of ecological and economic risks of land degradation from industrial sources in Perm Krai	25
<i>Lepekhin P.P., Murasheva A.A., Cherkashina E.V., Gruzdev V.S., Stolyarov V.M.</i> Optimization of information support for land use in cross boundary territories: issues of land management and cadastral recording (using the Russian Kazakhstan border region as an example)	32
<i>Korobkova E.I.</i> Analysis of the properties of Haralick textural features of the image and examples of their use for thematic decoding of space images	44
<i>Pham Dang Hien.</i> Comparison of satellite data sources for land-cover classification and monitoring of urban green spaces: a case study of Thuy Nguyen, Hai Phong city, Vietnam	57
SECTION 2. Information systems and technologies in science and education	68
<i>Atamanov S.A., Goreva A.Yu.</i> Application of artificial intelligence in spatial data analysis for cadastral, land management and urban planning activities	68
<i>Ikhsanova E.A., Aidarbekova D.R.</i> Automated monitoring of pipeline right-of-way for third-party interference detection	75
<i>Lossov K.I.</i> Hierarchical GIS data access via elements of amalgamated subgroup	80
<i>Shapovalov D.A., Jalilov M.B., Lukyanova T.S., Gruzdev V.S., Khutorova A.O.</i> Modern remote sensing technologies for monitoring reclaimed agricultural landscapes: an analysis of capabilities for rice-growing systems in Southern Russia	87
SECTION 3. Technical science	93
<i>Litvinenko A.A., Vankov Yu.V.</i> Effect of leaks and inter-circuit cross-leakage on the thermal characteristics of a heat exchanger for condition diagnostics	93
<i>Nabiullina M.F., Mingaleeva G.R.</i> Influence of operating conditions on the efficiency of a hybrid power plant operating as part of an agricultural energy complex	101
<i>Ponomarev R.A., Vankov Yu.V., Busarov A.V.</i> Techno-economic assessment of cassette phase-change heat accumulator in individual heating substation	109
SECTION 4. Information section	114
<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 II quarter of 2026	114
Information about editorial council	127
Rules for authors	129

ВОЗМОЖНОСТЬ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ КРУПНЫХ НАДВИГОВ И ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ВНУТРИКОНТИНЕНТАЛЬНОМ НАДВИГЕ

Парфенюк О.И.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, 123242, Москва, Россия
e-mail: oparfenuk@mail.ru

Общие черты коллизионных надвиговых структур отражают эффект основного тектонического события – горизонтального сокращения в обстановке сжатия и надвигания блоков континентальной коры, сопровождаемого утолщением жесткой верхней коры, формированием поднятий и их компенсации вязкими течениями в нижней коре и литосферной верхней мантии. Рассмотрен процесс образования внутриконтинентальных орогенов и показано, при каких условиях и напряжениях возможно осуществление крупных надвигов. «Корни» коры могут либо постепенно размываться в результате эрозии верхней коры и вязких течений, либо сохраняться в ходе последующей эволюции.

На основе разработанной модели внутрикратонного надвига в условиях реологически расслоенной литосферы (нижняя кора – слабый слой) получены картины эволюции напряжений в вязких слоях нижней коры и литосферной верхней мантии. Показано, что давление и сдвиговые напряжения значительно возрастают в результате процессов горизонтального сокращения коры и действия нагрузки над зоной надвига.

Ключевые слова: коллизия, надвиг, реология, вязкая релаксация, давление, напряжения, численное моделирование.

POSSIBILITY OF LARGE THRUSTS ORIGIN AND TECTONIC STRESSES OF INTRACONTINENTAL C COLLISIONAL OROGENS

Parphenuk O.I.

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 123242, Moscow, Russia

Fundamental common features of collision zones reflect the effect of the main tectonic event – horizontal shortening in compression setting and collision of continental plates by overthrusting, accompanied by the thickening of the rigid upper crust and viscous flow in the lower crust and the upper mantle. Possible mechanism of intracontinental collisional thrusts formation is presented and it was shown under which conditions and stresses the possibility exists for the large thrusts formation. Deep crustal roots can be attenuated or preserved in the process of the upper crust denudation and viscous flow adjustment.

Based on the model of intracratonic thrust for the rheologically layered lithosphere (the lower crust is the «weak» layer) evolution of stress field is calculated for the high viscous areas of the lower crust and lithospheric upper mantle. It was shown that the pressure and shear stresses significantly increase in the result of the processes of horizontal shortening of the upper crust and additional loading over the thrust zone.

Keywords: collision, overthrusting, rheology, viscous relaxation, pressure, stresses, numerical modelling.

Введение

Особенности геофизических полей и структуры литосферы в областях тектонотермальной переработки дают основание полагать, что процессы коллизии и горизонтального сокращения литосферы происходили во многих областях земной коры по однотипному механизму в обстановке тангенциального сжатия и привели в ходе последующей эрозии к обнажению на поверхности пород вплоть до средней и нижней коры. Таким образом, глубоко эродированные области древних щитов позволяют изучать породы, сформировавшиеся на глубинах 20-40 км. Фундаментальные общие черты коллизионных надвиговых структур отражают эффект основного тектонического события – горизонтального сокращения в обстановке сжатия и надвигания блоков континентальной коры, сопровождаемого утолщением жесткой верхней коры, и их компенсацией вязкими течениями на уровне нижней коры и литосферной верхней мантии. В многочисленных исследованиях раннепротерозойских областей колли-

зии убедительно показано, что типичной ситуацией для докембрия является образование коллизионных поясов в обстановке высоких температур и, следовательно, реологически слабой литосферы. Горизонтальное сокращение литосферы в этом случае ограничивается жесткой верхней корой, что находит подтверждение в полевых исследованиях и лабораторных экспериментах. Процесс сокращения коры сопровождается образованием поднятий с «корнями» коры, которые постепенно размывались в результате эрозии поверхности и вязкой релаксации на уровне нижней коры. Детально происхождение различного типа внутриконтинентальных орогенов рассмотрено в [1,2].

Возможность осуществления крупных надвигов

Известно, что верхняя кора рассечена вертикальными и наклонными нарушениями, разделяющими ее на блоки [3]. В постановке задачи о реализации внутрикратонного надвига при горизонтальном сокращении коры на 50-100 км (например,

Лапландский гранулитовый пояс Балтийского щита, структурная зона Капускейсинг Канадского щита) принято разбиение верхней коры на блоки, которые слабо связаны друг с другом. Такой жесткий, но гибкий слой может перемещаться без деформации в горизонтальном направлении вдоль основного разлома [4-6].

Исследование поведения разломов на основе сейсмотектонических данных и лабораторных экспериментов по изучению свойств геоматериалов при различных нагрузках позволило сделать ряд важных выводов о возможности осуществления движения (надвига) при относительно большой протяженности горизонтального смещения [5,7]. Вопрос о существовании таких движений известен как «парадокс больших сдвигов» [8-10]. Самые крупные амплитуды смещений (надвигов) составляют десятки километров. Минимальная величина касательного напряжения, необходимого для образования сдвига, определяется уравнением Кулона (1776 г.), которое с некоторыми уточнениями до настоящего времени является основой количественного анализа сдвиговых нарушений в механике горных пород:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где c – сцепление, σ – нормальное напряжение, τ – касательное напряжение, φ – угол внутреннего трения. В правую часть соотношения (1) входят величины, уменьшенные на величину влияния порового давления, следовательно, присутствие в породах воды под некоторым поровым давлением облегчает развитие сдвиговых деформаций [9]. В наиболее благоприятных условиях для скольжения (отсутствие сцепления и фронтального сопротивления) уравнение скольжения (1) принимает вид

$$\tau = \sigma \cdot \mu, \quad (2)$$

где μ – коэффициент внешнего трения скольжения. Принимая, что σ – литостатическое давление и приравнявая движущую тектоническую силу силе сопротивления (трения), получим, что

$$\tau = \mu \rho g L. \quad (3)$$

Этим равенством определяется величина тектонического напряжения, необходимого для перемещения надвигового покрова длиной L [10]. Для типичных значений тектонических напряжений $\tau = 100$ МПа, длины покрова $L = 50$ км и $\rho = 2750$ кг/м³ получаем коэффициент трения $\mu = 0.072$. Т.е. существование надвиговых покровов оказывается возможным только при низких значениях коэффициента трения. Типичное значение коэффициента трения ограничено сверху величиной 0.6 и составляет в среднем примерно 0.3 [11,12]. Так называемый «парадокс

больших надвигов» состоит в том, что фактическое существование покровов не вызывает сомнений, но при этом сложно согласовать наблюдаемые высокие значения коэффициента трения с оценкой требуемых для осуществления надвига напряжений. В качестве причин, снижающих внутреннее и внешнее трение, были предложены следующие. Во-первых, это присутствие высокопластичных пород в качестве «смазки» вдоль поверхностей надвигов в виде либо особого типа пород, либо в обстановке частичного плавления при средне-коровых давлениях. Во-вторых, присутствие воды в сильно пористых породах [9], т.к. вода, будучи практически несжимаемой, принимает на себя всю нагрузку, что приводит к уменьшению величины эффективных напряжений. Теория М. Хубберта и У. Раби о первостепенном значении порового давления до сих пор учитывается практически во всех объяснениях образования крупных надвиговых покровов. Касательные напряжения в этих условиях не изменяются, а нормальные напряжения, повышающие сцепление и трение, уменьшаются. Происходит прерывистое движение – *stick-slip motion* – в условиях периодически накапливающихся напряжений. Тектонические процессы в присутствии воды не ограничиваются изменением нормальных напряжений, но приводят также к «смазыванию» поверхностей, способствующему перемещению блоков и развитию трещин [13]. В качестве возможного механизма понижения прочности предложен также эффект Ребиндера [14]: инфильтрация флюида из астеносферы в литосферу приводит к быстрому уплотнению пород основного состава и позволяет осуществиться сильному сжатию литосферы, т.е. формированию складчатых поясов на континентах.

Особое значение в реализации движения по разломам имеет подвижность взаимодействующих блоков геоматериала [4,5]. Эксперименты с моделями массивов, искусственно составленными из многоугольных блоков различной формы, показали, что такая кладка при неравномерном обжатии приобретает весьма низкое сопротивление сдвигу. Обнаружено, что прямоугольные блоки приводят к несколько большей прочности на сдвиг, чем блоки гексагональной формы, но дают меньшее разрыхление, что уменьшает вероятность дилатансионного запирания при течении сжатого между бортами разлома раздробленного геоматериала. Поэтому энергетически более выгодной в рассматриваемых условиях является прямоугольная форма блоков дробления материала. Кроме того, было обнаружено, что в зоне локализации сдвиговой деформации образуются закономерные системы блоков, которые приобретают установившееся значение сопротивления сдвигу, существенно меньшее максимального. В механике горных пород такой процесс называют квазипластическим, а в геологии – катакластическим [5].

Катакластическое течение фиксируется в выходах на дневную поверхность разломов некоторых древних щитов [15].

Существование слоя, который оказывает наименьшее сопротивление сдвигу, является принципиально важным для концепции тектонически расслоенной литосферы и для изучения явления прерывистого скольжения в условиях резкого возрастания и сброса напряжения. Важнейшее воздействие флюидной (жидкой) фазы на реологические свойства твердого тела состоит в увеличении его деформируемости, когда реология твердого тела сближается с реологией ньютоновской жидкости. При этом такая деформируемость реализуется посредством развития и функционирования глубинных сдвиговых зон [16,17]. Таким образом, распределение вертикальных и горизонтальных усилий в литосферных плитах оказывает влияние на строение, расположение и развитие разломов, а сама динамика литосферных плит реализуется прежде всего по системе разломов, поскольку материал в них оказывает наименьшее сопротивление сдвигу. Эти представления использованы при постановке и решении задачи об изучении движения по типу надвига вдоль разлома. Горизонтальное сокращение коры происходит со скоростями несколько сантиметров в год, что соответствует скоростям деформаций $10^{-14} - 10^{-15} \text{ см}^{-1}$, характерным для коллизионных процессов. Например, для современной зоны конвергенции Индия-Евразия оценки скорости деформаций приводят к величинам $1.1 \cdot 10^{-15} - 7.7 \cdot 10^{-15} \text{ см}^{-1}$ [18,19].

Модель внутриконтинентального надвига

Исследование коллизионных структур проводится на основе комплексной модели тепловой и динамической эволюции области надвига для рео-

логически расслоенной литосферы и включает разбитую на блоки жесткую верхнюю кору, нижнюю кору и литосферную верхнюю мантию, которые различаются значениями эффективной вязкости. Задача решается методом конечных элементов с использованием сетки, деформируемой во времени (метод Лагранжа). Горизонтальное сокращение коры сопровождается надвигом вдоль разлома блоков верхней коры вдоль наклонной зоны нарушений, появлением дополнительной нагрузки на слои, лежащие под этой зоной, и эрозией образующихся покровов. Эти процессы компенсируются вязкими течениями на глубинах нижней коры и верхней мантии (рис. 1).

Для моделирования вязких течений на глубинах нижней коры и литосферной верхней мантии методом конечных элементов уравнения движения и неразрывности для двухслойной несжимаемой вязкой жидкости решались в приближении ньютоновской реологии:

$$\begin{cases} \mu_i \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla P - \rho_i \mathbf{g} = 0 \\ \nabla \mathbf{u} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь P – давление, $\mathbf{u}$ – вектор скорости, ρ – плотность, μ – эффективная кинематическая вязкость, $\mathbf{g}$ – ускорение силы тяжести. Индексы $i=1,2$ соответствуют веществу нижней коры и литосферной верхней мантии.

В данной модели деформации жесткой верхней коры рассматриваются лишь в общем виде: надвиг, дополнительная нагрузка и ее перераспределение (эрозия и осадконакопление) не включаются непосредственно в механические расчеты, а используются в качестве граничных условий для вязких течений [6]. Поэтому в данной постановке рассчитываются напряжения только в нижней коре и литосферной

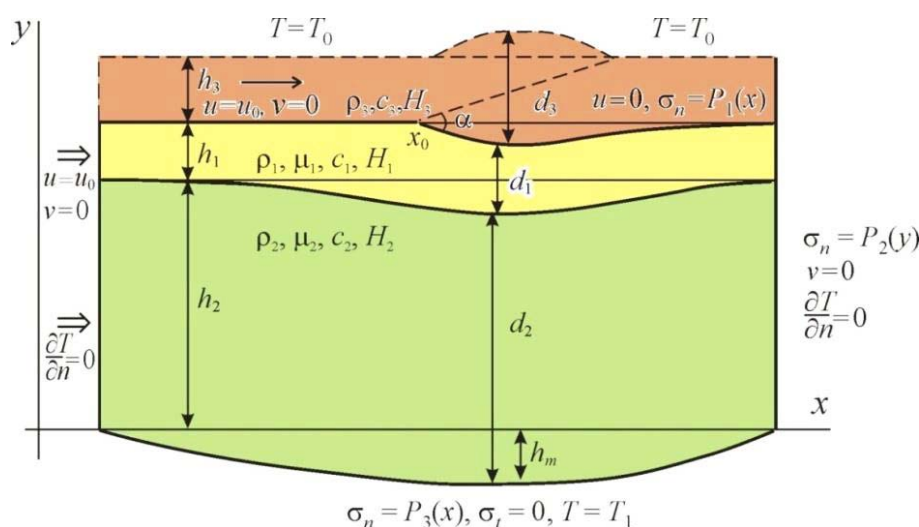


Рис. 1. Геометрия модели деформаций для механической и тепловой задач: верхняя кора ($i=3$) – коричневый, нижняя кора ($i=1$) – желтый, литосферная верхняя мантия ($i=2$) – зеленый. h_1, h_2, h_3 – исходные значения мощностей нижней коры, верхней мантии и верхней коры, h_m – величина отклонения нижней границы; d_1, d_2, d_3 – мощности нижней коры, литосферной мантии и верхней коры в процессе деформаций, u_0 – скорость горизонтального сокращения, α – угол падения разлома

верхней мантии, деформируемых в процессе изменения нагрузки в верхней коре. Горизонтальное сокращение моделируется движущейся левой вертикальной границей и условием прилипания слева от разлома, где верхняя и нижняя кора движутся с одинаковой скоростью (движение без проскальзывания) $u=(u_0, 0)$. Таким образом, горизонтальная скорость движения верхней границы равна скорости движения верхней коры слева от разлома и равна нулю справа от разлома. Нормальная составляющая силы, действующей на верхнюю границу рассматриваемой области, имеет неравномерное распределение из-за латеральных вариаций в распределении массы материала верхней коры в результате надвига и эрозии. В правой части модели, включающей область надвига, эффект нагрузки учтен в граничном условии, когда нормальное напряжение равно литостатическому давлению, создаваемому весом вышележащих пород. Нижняя граница литосферы может отклоняться как из-за влияния горизонтального сокращения коры, так и в результате воздействия дополнительной нагрузки в предположении, что подстилающая астеносфера является существенно менее вязкой, чем литосфера. Поэтому на нижней границе литосферы предполагается выполненным условие литостатического равновесия (т.е. нормаль-

ное напряжение полагается равным литостатическому давлению на данной глубине в отсутствие дополнительной нагрузки). Тангенциальное напряжение равно нулю, т.е. выполнено условие горизонтального проскальзывания.

Результаты реологических исследований образцов нижней коры (один из них – из архейской области Пиквитоней провинции Сьюпериор, второй – непосредственно из зоны Капускейсинг) (рис. 2) подтверждают выводы о том, что граница Мохо является в определенном смысле и реологической границей и что нижняя кора является реологически более слабым слоем, чем литосферная мантия.

Максимальные условия метаморфизма для этих образцов (P - T – условия) оцениваются величинами 640 МПа, 630-750°C и 600-800 МПа, 800-1000°C соответственно [20]. Для гранулитов области Пиквитоней (провинция Сьюпериор) Вилкс и Картер [20] оценили значения физических параметров, определяющих ползучесть

$$\varepsilon = A \sigma^n \exp\{-H/RT\}, \quad (5)$$

следующими величинами: $n=4.2$, $A=1.4 \cdot 10^4$ МПа $^{-n} \cdot c^{-1}$, $H=445$ кДж $\cdot$ моль $^{-1}$. Аналогичные значения получены для образцов пород гранулитового состава из

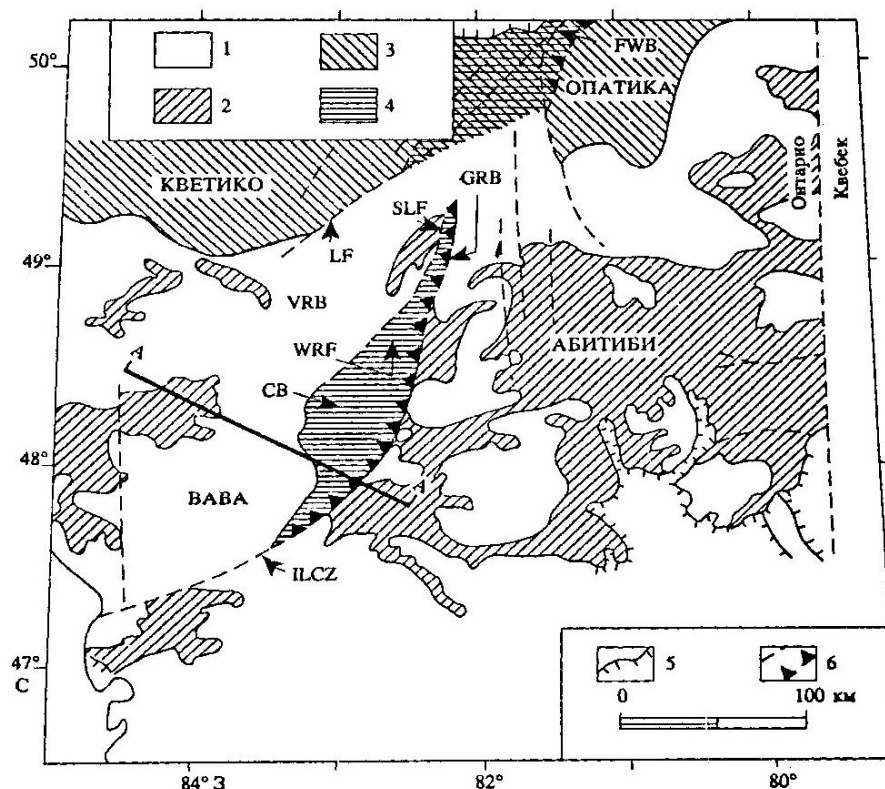


Рис. 2. Схема геологического строения области Капускейсинг в центре провинции Сьюпериор Канадского щита. Показаны структурная зона Капускейсинг (область с горизонтальной штриховкой) и 4 провинции – Вава, Абитиб, Кветико, Опатика. Отмечены некоторые важные структуры: катакластическая зона озера Иванхое (ILCZ), разлом Лепата (LF), разлом озера Саганаш (SLF), разлом реки Вакусими (WRF), блок Фрейсдала-Мозоне (FMB), блок Граундхог ривер (GRB), блок Чаплоа (CB) и блок Вал-Рита (VRB). Условные обозначения: 1 – плутоны, ортогнейсы; 2 – метавулканические породы; 3 – метасадочные магматиты; 4 – гранулитовая фация; 5 – граница протерозоя и фанерозоя; 6 – разломы: нормальный, надвиговый [12]

структурной зоны Капускейсинг. Изучение ползучести дунита, который может иметь реологию, аналогичную реологии литосферной мантии, позволило Посту [21] определить следующие значения параметров в соотношении (5): $n=3.0$, $A=4.3 \cdot 10^2 \text{ МПа}^{-n} \text{ с}^{-1}$, $H=527 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$.

Напряжения при надвиге в нижней коре и литосферной верхней мантии

Экспериментальные данные по ползучести оливина были опубликованы многими авторами. Оценки эффективной вязкости близки к оценкам для дунита в условиях мантии: $n=3.5$, $A=3.0 \cdot 10^4 \text{ МПа}^{-n} \text{ с}^{-1}$, $H=533 \text{ кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$. Параметры дунита часто используются для оценок мантийной реологии, т.к. они приводят к значению эффективной вязкости порядка 10^{21} - $10^{22} \text{ Па} \cdot \text{с}$ в основании литосферы, что согласуется с оценками вязкости, полученными по результатам исследования послеледникового поднятия [22]. Рис. 3 показывает изменение эффективной вязкости для гранулитов области Пиквитоней, сухого дунита и сухого оливина в диапазоне температур 500-1000°C при скорости деформаций 10^{-14} с^{-1} . Из приведенных расчетов следует, что эффективная вязкость пород нижней коры может иметь значения в диапазоне 10^{21} - $10^{22} \text{ Па} \cdot \text{с}$, в то время как эффективная вязкость мантии ниже Мохо оказывается выше на 1-2 порядка.

Эти значения эффективной вязкости в предположении ньютоновской (линейной) реологии нижней коры и литосферной верхней мантии предполагались в проводимых нами расчетах для определения влияния основных параметров модели на величину напряжений. Скорость горизонтального сокращения (надвига) оказывает значительное влияние на значения напряжений, возникающих в обстановке сжатия. В иллюстрациях ниже масштабы в направлениях x и y (y положительно вверх и за ноль принято начальное положение нижней гра-

ницы области) показаны в безразмерных единицах. Начальный размер области 500 на 100 км. На рис. 4 приведены картины распределения полных напряжений, включая литостатическое давление и вязкие напряжения, в моменты времени, близкие к завершению надвига, для скоростей 0.5 см/год (рис. 4а) и 2 см/год (рис. 4б). Начальное состояние области под зоной надвига полагалось литостатическим. Давление и сдвиговые напряжения значительно возрастают в результате процессов горизонтального сокращения коры и действия нагрузки над зоной надвига. Естественно, что увеличение скорости коллизии приводит к возрастанию напряжений при том же значении величины горизонтального сокращения. Максимальные значения сдвиговых напряжений достигаются непосредственно под и поблизости от начальной области действия нагрузки и изменяются от 150 МПа для скорости сокращения 0.5 см/год до почти 200 МПа при скорости надвига $u=2 \text{ см/год}$ при возрастании полных напряжений от 1 ГПа до 1.14 ГПа. Максимальные горизонтальные вязкие напряжения концентрируются в области основного сокращения и составляют 1.2-5% от величины полного напряжения на данной глубине.

Следует отметить, что в приближении линейной реологии при постоянной скорости сокращения изменение эффективной вязкости приводит к пропорциональному изменению напряжений, т.е. влияние этого параметра аналогично влиянию скорости надвига: чем выше вязкость, тем больше значения напряжений. На рис. 5а,б показаны изолинии полных напряжений на момент завершения надвига при сокращении коры на 64 км ($t = 6.4 \text{ млн лет}$) при скорости надвига 1 см/год. Значения вязкости отличаются на порядок (вязкость нижней коры $5 \cdot 10^{21} \text{ Па} \cdot \text{с}$ для изобар на рис. 5а и $5 \cdot 10^{22} \text{ Па} \cdot \text{с}$ для изолиний на рис. 5б). Контраст вязкости нижней коры и верхней мантии составляет также один порядок величины.



Рис. 3. Эффективная вязкость дунита, сухого оливина и гранулитов области Пиквитоней в диапазоне температур 500-1000°C, рассчитанная для скорости деформации 10^{-14} с^{-1}

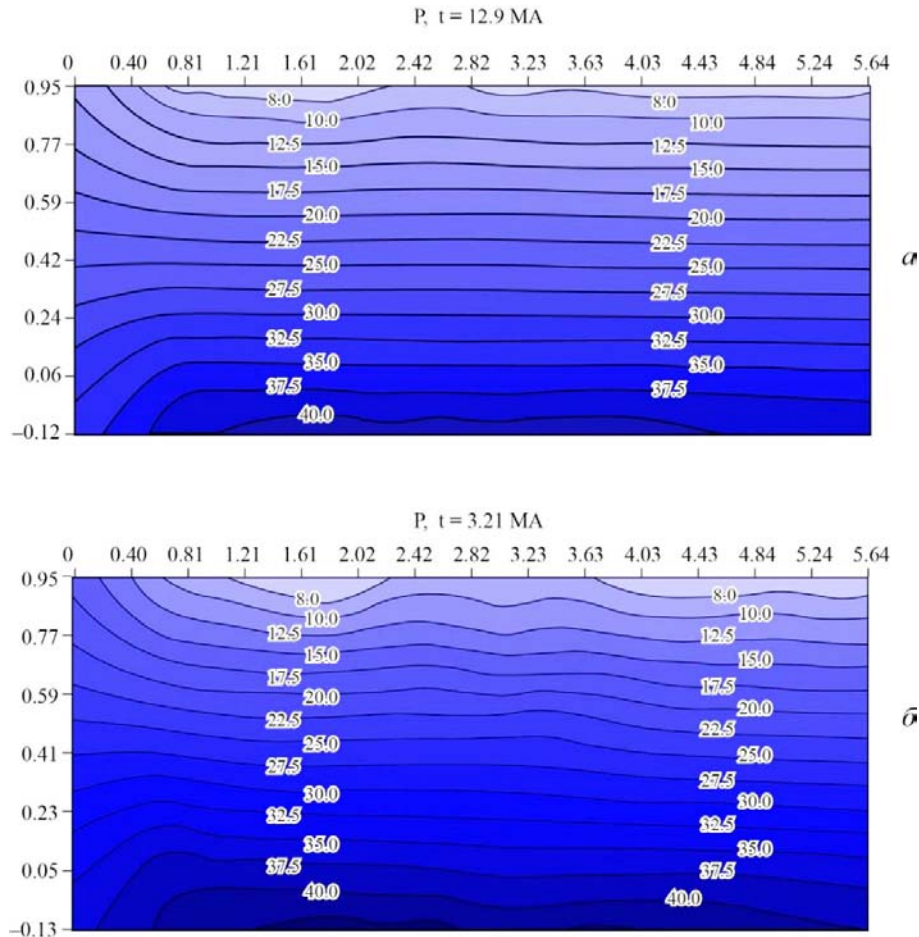


Рис. 4. Изолинии полных напряжений (в кбар, или 10^{-2} МПа). а) $u=0.5$ см/год; б) $u=2$ см/год. Вязкость нижней коры $5 \cdot 10^{21}$ Па·с

Сдвиговые напряжения возрастают от 140 до 250 МПа. Рис. 5в показывает изолинии полных напряжений спустя примерно 4.6 млн лет после завершения надвига. Следует отметить, что посторогенная релаксация напряжений происходит со скоростью, примерно в 7 раз меньшей в случае более высокой вязкости. На деформацию границ значения вязкости оказывают довольно слабое влияние: менее ярко рельеф выражен в случае меньшей вязкости, но отклонения топографии углубления достигают величины 1-2 км.

Выводы

Приведенные результаты расчетов вязких напряжений в нижней коре и литосферной верхней мантии при внутриконтинентальном надвиге приводят к следующим выводам. Форма и значение отклонения границы Мохо от региональных значений, а также тектонические напряжения, которые вызывают процесс сокращения и надвига, ограничивают возможный диапазон значений вязкости величинами $10^{21} - 2 \cdot 10^{22}$ Па·с для нижней коры и $5 \cdot 10^{22} - 5 \cdot 10^{23}$ Па·с для литосферной верхней мантии. Повидимому, для более холодных регионов можно ис-

пользовать верхние оценки, для более «горячих» – нижние. С учетом реальных данных по конкретной области исследований этот диапазон может быть уточнен.

Максимальные сдвиговые напряжения на границе верхней и нижней коры достигаются под областью надвига и изменяются от 150 МПа при скорости сокращения 0.5 см/год до почти 200 МПа при скорости надвига $u=2$ см/год. Максимальные горизонтальные вязкие напряжения концентрируются в области основного сокращения и составляют 1.5-5% полного напряжения на данной глубине. В комплексе с результатами ранее проведенных (2020-2025 гг.) исследований тепловой истории и динамики деформаций областей континентальной коллизии [6,23] можно заключить, что формирование и эволюция раннепротерозойских областей внутрикратонного надвига происходили при невысоких скоростях горизонтального сокращения коры в обстановке относительно высоких температур, приводящих к невысоким значениям вязкости нижней коры (порядка $10^{21} - 10^{22}$ Па·с) и литосферной верхней мантии.

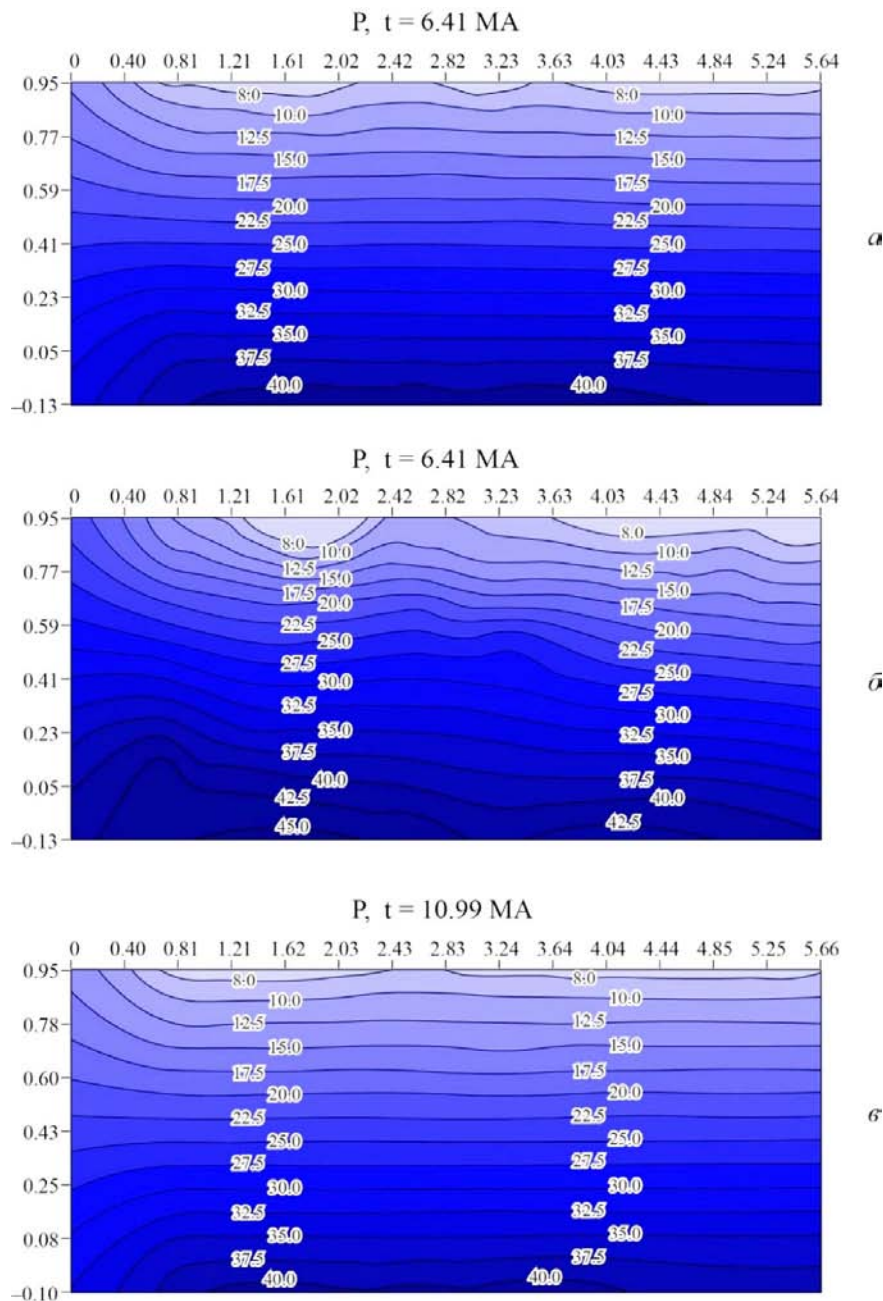


Рис. 5. Изолинии полных напряжений в момент завершения надвига ($t=6.4$ млн лет): а) $\nu_1=5 \cdot 10^{21}$ Па·с, $\nu_2=5 \cdot 10^{22}$ Па·с; б) $\nu_1=5 \cdot 10^{22}$ Па·с, $\nu_2=5 \cdot 10^{23}$ Па·с; в) $t=4.6$ млн лет после завершения надвига для сценария на рисунке а

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФЗ РАН.

Список литературы

1. Wang Y. Intracontinental Tectonics and Orogeny. Cambridge: Cambridge Scholars Publishing. 2025. Pp. 1-435.
2. Wang Y., Zheng Y.F. Origin and genesis of intracontinental orogens. Science China Earth Sciences. 2025. V. 68. <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1733-x>.
3. Садовский М.А. Естественная кусковатость горной породы // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247. №4. С. 829-831.
4. Николаевский В.Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра. 1996. 447 с.
5. Гарагаш И.А., Жорин В.А., Лившиц Л.Д., Николаевский В.Н. Сверхпластическое течение материала внутри разлома // Физика Земли. 1986. №1. С. 12-24.
6. Parphenuk O.I. Uplifts formation features in continental collision structures (evolution modeling). Russian Journal of Earth Sciences. 2015. V. 15. No. 4. ES4002. doi: 10.2205/2015ES000556.
7. Николаевский В.Н., Шаров В.И. Разломы и реологическая расслоенность земной коры // Физика Земли. 1985. №1. С. 16-28.
8. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Мир. 1969. Т. 2. 863 с.
9. Hubbert M.K., Rubey W.W. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. Geol. Soc. Am. Bull. 1959. V. 70. No. 6. Pp. 115-116.
10. Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика: Геологические приложения физики сплошных сред. Ч.1: Пер. с англ. М.: Мир. 1985. 376 с.

11. Byerlee J.D. Friction of rocks. *Pure Appl. Geophys.* 1978. V. 116. Pp. 615-626.
12. Brewer J. Thermal effects of thrust faulting. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1981. V. 56. Pp. 233-244.
13. Ярошевский В. Тектоника разрывов и складок. М.: Недра. 1981. 245 с.
14. Артюшков Е.В. Постколлизинное развитие складчатых поясов как следствие глубинных процессов в коре и мантии // Постколлизинная эволюция подвижных поясов. Тез. Докл. Международной научной конференции. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН. 2001. С. 18-20.
15. Grocott J.S. The relation between Precambrian shear belts and modern fault systems. *J. Geol. Soc. London.* 1977. V. 133. Pt. 3-4. Pp. 257-262.
16. Калинин В.А., Родкин М.В., Томашевская И.С. Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. М.: Наука. 1989. 157 с.
17. Родкин М.В. Роль глубинного флюидного режима в геодинамике и сейсмотектонике. М. 1993. 193 с.
18. Muller W., Aerden D., Halliday A.N. Isotopic dating of strain fringe increments: duration and rates of deformation in shear zones. *Science.* 2000. V. 288. Pp. 2195-2198.
19. Rollanda Y., Lardeaux J.-M., Jolivet L. Deciphering orogenic evolution. *Journal of Geodynamics.* 2012. V. 56-57. Pp. 1-6.
20. Wilks K.R., Carter N.L. Rheology of some continental lower crustal rocks. *Tectonophysics.* 1990. V. 182. Pp. 57-77.
21. Post R.L. High temperature creep of Mt. Burnet dunite. *Tectonophysics.* 1977. V. 42. Pp. 75-110.
22. Peltier W.R., Wu P., Yuen D.A. The viscosities of the Earth's mantle. *Am. Geophys. Un., Geodyn. Ser.* 1981. V. 4. Pp. 59-77.
23. Парфенюк О.И. Эволюция внутриконтинентальных коллизионных структур раннего протерозоя с точки зрения их современного строения // Мониторинг. Наука и технологии. 2024. №3(61). С. 24-35. DOI: <https://doi.org/10.25714/MNT.2024.61.004>.

References

1. Wang Y. Intracontinental Tectonics and Orogeny. Cambridge: Cambridge Scholars Publishing. 2025. Pp. 1-435.
2. Wang Y., Zheng Y.F. Origin and genesis of intracontinental orogens. *Science China Earth Sciences.* 2025. V. 68. <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1733-x>.
3. Sadovskii M.A. *Yestestvennaya kuskovatost' gornoy porody* [Natural breaking of rocks]. Report of the USSR Academy of Sciences. 1979. V. 247. No. 4. Pp. 829-831.
4. Nikolaevskii V.N. *Geomekhanika i flyuidodinamika* [Geomechanics and Fluidodynamics]. Moscow: Nedra. 1996. 447 p.
5. Garagash I.A., Jin V.A., Livshits L.D., Nikolaevskii V.N. Superplastic material flow inside the fault. *Fizika Zemli.* 1986. No. 1. Pp. 12-24.
6. Parphenuk O.I. Uplifts formation features in continental collision structures (evolution modeling). *Russian Journal of Earth Sciences.* 2015. V. 15. No. 4. ES4002. doi: 10.2205/2015ES000556.
7. Nikolaevskii V.N., Sharov V.I. Faults and rheological layering of the crust. *Fizika Zemli.* 1985. No. 1. Pp. 16-28.
8. Nadai A. *Plastichnost' i razrusheniye tverdykh tel* [Plasticity and destruction of the solid rocks]. Moscow: Mir. 1969. V. 2. 863 p.
9. Hubbert W.K., Rubey W.W. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1959. V. 70. No. 6. Pp. 115-116.
10. Turcotte D., Schubert J. *Geodinamika: Geologicheskiye prilozheniya fiziki sploshnykh sred. CH.1: Per. s angl* [Geodynamics. Applications of continuum physics to geological problems. Part 1]. Moscow: Mir. 1985. 376 p.
11. Byerlee J.D. Friction of rocks. *Pure Appl. Geophys.* 1978. V. 116. Pp. 615-626.
12. Brewer J. Thermal effects of thrust faulting. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1981. V. 56. Pp. 233-244.
13. Yaroshevskii V. *Tektonika razryvov i skladok* [Tectonics of the faults and folds]. Moscow: Nedra. 1981. 245 p.
14. Artyushkov E.V. Postkollezionnoye razvitiye skladchatykh pojasov kak sledstviye glubinykh protsessov v kore i mantii [Postcollisional development of fold belts as a result of deep processes in the crust and mantle]. Post-collisional evolution of mobile belts. Abstracts of the International Scientific Conference. Yekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. 2001. Pp. 18-20.
15. Grocott J.S. The relation between Precambrian shear belts and modern fault systems. *J. Geol. Soc. London.* 1977. V. 133. Pt. 3-4. Pp. 257-262.
16. Kalinin V.A., Rodkin M.V., Tomashevskaya I.S. *Geodinamicheskiye efekty fiziko-khimicheskikh prevrashcheniy v tverдой srede* [Geodynamical effects of physical and chemical transformations in the solid rocks]. Moscow: Nauka. 1989. 157 p.
17. Rodkin M.V. *Rol' glubinnogo flyuidnogo rezhima v geodinamike i seysmotektonike* [The role of deep fluid regime in geodynamics and seismotectonics]. Moscow. 1993. 193 p.
18. Muller W., Aerden D., Halliday A.N. Isotopic dating of strain fringe increments: duration and rates of deformation in shear zones. *Science.* 2000. V. 288. Pp. 2195-2198.
19. Rollanda Y., Lardeaux J.-M., Jolivet L. Deciphering orogenic evolution. *Journal of Geodynamics.* 2012. V. 56-57. Pp. 1-6.
20. Wilks K.R., Carter N.L. Rheology of some continental lower crustal rocks. *Tectonophysics.* 1990. V. 182. Pp. 57-77.
21. Post R.L. High temperature creep of Mt. Burnet dunite. *Tectonophysics.* 1977. V. 42. Pp. 75-110.
22. Peltier W.R., Wu P., Yuen D.A. The viscosities of the Earth's mantle. *Am. Geophys. Un., Geodyn. Ser.* 1981. V. 4. Pp. 59-77.
23. Parphenuk O.I. Intracontinental paleoproterozoic collisional orogens evolution issuing from the present structures. *Monitoring. Nauka i tekhnologii.* 2024. No. 3(61). Pp. 24-35. DOI: <https://doi.org/10.25714/MNT.2024.61.004>.

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Парфенюк Ольга Ивановна

доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией теоретической геофизики Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, 123242, Москва, Россия

Information about authors Affiliations

Parphenuk Olga Ivanovna

Doctor of Physics and Mathematics, Head of Theoretical Geophysics Laboratory of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 123242, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 21.08.2026 г.

ОБЪЕМНАЯ МОДЕЛЬ РАЗДРОБЛЕННОСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ В БАССЕЙНЕ РЕКИ КОЗЫРЕВКА (КАМЧАТКА)

Сидоров М.Д.

*Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН,
683002, Петропавловск-Камчатский, Россия
e-mail: smd1952z@gmail.com*

Изучена проницаемость земной коры в одном из геотермальных районов Камчатки. Построена объемная модель раздробленности геосреды в бассейне реки Козыревка. Проведен линеаментный анализ материалов гравиметрической, аэромагнитной съемок, радарных снимков рельефа и фотоизображения местности. Исследована энтропия и стандартное отклонение данных. Применены алгоритмы анализа текстуры, нахождения линеаментов, границ, пороговых значений и степени структурной сложности. Линеаменты характеризуют раздробленность участка коры. Создана послойная база данных удельной длины линеаментов (УДЛ) до глубины 3 км. Величина УДЛ изменяется в широких пределах. Характерно мозаичное чередование разрушенных и относительно целых блоков. Часть раздробленных блоков образуют на глубине единые проницаемые зоны. Наибольшая плотность линеаментов отмечается в долине реки Козыревка. По раздробленным зонам вероятно проникновение метеорных (атмосферных) вод на глубину, также как и встречная миграция глубинных магматогенных вод и флюидов к приповерхностным горизонтам. Источником горячих магматогенных вод может служить интрузия гранодиоритов, окруженная кольцевой проницаемой зоной.

Ключевые слова: Камчатка, линеамент, разлом, энтропия, коэффициент раздробленности, интрузия, модель, термоминеральные источники.

VOLUMETRIC MODEL OF CRUSTAL BREAKUP IN THE KOZYREVKA RIVER BASIN (KAMCHATKA)

Sidorov M.D.

*Research Geotechnological Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
683002, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

The permeability of the Earth's crust in one of the geothermal regions of Kamchatka has been studied. A three dimensional model of the fragmentation of the geoenvironment in the Kozyrevka River basin has been constructed. A lineament analysis was carried out using materials from gravimetric and aeromagnetic surveys, radar images of the relief, and photographic images of the terrain. The entropy and standard deviation of the data were examined. Algorithms for texture analysis were applied, including the identification of lineaments, boundaries, threshold values, and the degree of structural complexity. Lineaments characterize the fragmentation of the crustal section. A layered database of the Specific Length of Lineaments (SLL) has been created up to a depth of 3 km. The SLL value varies within a wide range. A mosaic alternation of destroyed and relatively intact blocks is characteristic. Some of the fragmented blocks form continuous permeable zones at depth. The highest density of lineaments is observed in the Kozyrevka River valley. Penetration of meteoric (atmospheric) waters into the depths is likely along fractured zones, as is the counter migration of deep seated magmatogenic waters and fluids to the near surface horizons. A source of hot magmatogenic waters may be a granodiorite intrusion surrounded by a ring shaped permeable zone.

Keywords: Kamchatka, lineament, fault, entropy, fracturing coefficient, intrusion, model, thermal mineral springs.

Введение

Исследованная площадь расположена в центральной части полуострова Камчатка, охватывает верхнее течение реки Козыревка, пересекающей одноименный хребет (рис. 1). Район сложен различными вулканогенными образованиями неоген-четвертичного возраста, является перспективным на термоминеральные воды. В долине р. Козыревка известны выходы термальных источников. Места термоминеральных проявлений непосредственно связаны с проницаемостью земной коры. Необходимым условием для образования термоминеральных (гидротермальных) месторождений являются источники тепла, которыми являются магматические

тела, и достаточное количество воды как глубинной (ювенильной и магматогенной), так и метеорной (атмосферной). Для прогнозирования таких месторождений важно знать пути миграции вод внутри коры к источникам тепла и земной поверхности. В этой связи необходимо изучение проницаемости коры.

Целью исследований является построение объемной модели раздробленности блока земной коры методом линеаментного анализа данных дистанционных зондирований и нахождение вероятных путей миграции гидротерм.

Под раздробленностью понимается совокупность трещин различного генезиса (тектонических,

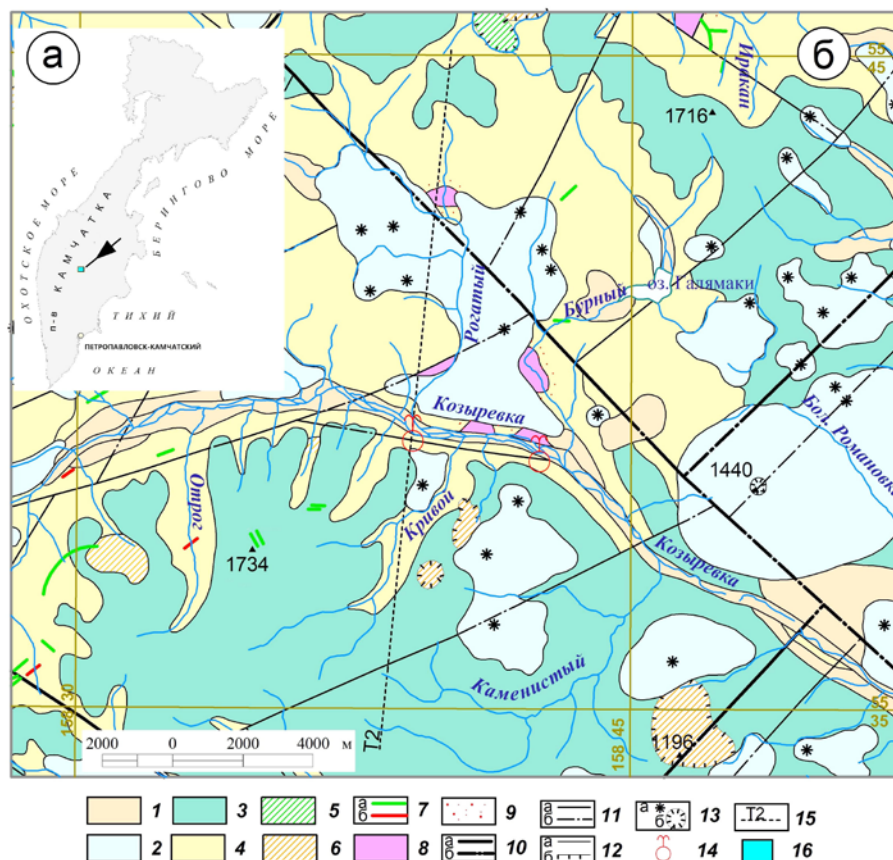


Рис. 1. Обзорная схема (а) и геологическая карта (б) района исследований [1].

1 – квартал, неоплейстоцен, голоцен. Ледниковые, гляциофлювиальные, аллювиальные, пролювиальные, коллювиальные рыхлые отложения. Валуны, галечники, пески, супеси, глины; 2 – квартал, неоплейстоцен, голоцен. Козыревско-сановаямский ВК. Базальты, их туфы (1050 м); 3 – квартал, эоплейстоцен. Срединненский ВК. Базальты, андезибазальты, их туфы, шлаки (600 м); 4 – неоген, плиоцен–миоцен. Крерукский, кахтунский, кававлинский, кимитинский ВК. Андезибазальты, андезиты, дациты, их туфы, игнимбриды (3700 м); 5–6 – субвулканические образования ВК андезитов (5), дацитов, риодацитов (6); 7 – дайки андезитов (а), дацитов (б); 8 – неоген, миоцен. Лавкинский интрузивный комплекс. Интрузии гранодиоритов, гранитов, диоритов; 9 – контактовые роговики; 10–11 – разломы главные (10) прочие (11), выходящие на поверхность (а), скрытые под вышележащими образованиями (б); 12 – геологические границы: согласного залегания (а), экструзий и жерловых образований (б); 13 – шлаковые конусы (а), кратеры (б); 14 – термоминеральные источники; 15 – линия разреза; 16 – площадь исследований (на схеме а)

контракционных, литогенетических, выветривания, микротрещин) в горных породах, обеспечивающих фильтрацию воды, которая в комплексе с пористостью, кавернозностью и другими пустотами характеризует общую проницаемость геологической среды. Объемная модель раздробленности дает возможность выявить места проникновения на глубину метеорных (атмосферных) вод, определить вероятные пути циркуляции магматогенных вод и восходящих глубинных флюидов, локализовать наиболее перспективные участки для поисков гидротерм.

Геологическое строение

Исследованная территория расположена в пределах крупной геологической структуры – Центрально-Камчатского вулканического пояса. Все вулканогенные образования рассматриваются как вулканические комплексы (ВК), объединяющие покровные, субвулканические, экструзивно-жерловые фации (рис. 1). Нижняя часть разреза представлена вулканическими комплексами миоцена: кимитинским, кававлинским и кахтунским. Покровные

фации сложены андезитами, дациандезитами, их туфами, базальтами, андезибазальтами, их туфами, туфами дацит-андезитового состава, туффитами, туфопесчаниками, туфоалевролитами. Покровные образования фациально резко изменчивы по разрезу и латерали. Туффиты и вулканокласто-осадочные породы приурочены к нижним и верхним частям толщ вулканитов. В составе покровной фации кававлинского ВК преобладают дациты, их туфы, игнимбриды. Покровные образования кахтунского комплекса с угловым и стратиграфическим несогласием залегают на более древних кававлинских и кимитинских вулканитах.

Вулканиды плиоценового возраста представлены отложениями крерукского ВК, которые с угловым несогласием и размывом залегают на нижележащих образованиях покровной и субвулканической фаций кахтунского комплекса. Покровная фация представлена андезитами, андезибазальтами, их туфами, дацитами, их туфами и игнимбридами. Вулканические образования квартала представлены

эоплейстоценовым срединненским и неоплейстоцен-голоценовым козыревско-сановаямским ВК. Покровные фации обоих комплексов сложены преимущественно базальтами, андезибазальтами, андезитами, тефрой и туфами. Суммарная мощность покровных фаций всех вулканических комплексов более 5 км. Рыхлые отложения квартара распространены незначительно в долине р. Козыревки, межгорных впадинах и цирках. Мощность не превышает десятков метров.

Породы субвулканической фации вулканических комплексов представлены субвулканическими, экструзивными, жерловыми и плутоническими образованиями. Они слагают куполовидные тела, штоки, дайки и сосредоточены, главным образом, в центральных частях вулканоструктур и вблизи тектонических нарушений в поле развития соответствующих ВК, а по составу соответствуют породам покровных фаций. Интрузивные породы лавкинско-плутонического комплекса распространены незначительно в среднем течении р. Козыревка в виде однофазных плутонических интрузий, большинство которых – это мелкие простые штоки. Площадь выходов 0.2-0.8 км². В общем объеме пород резко преобладают гранодиориты, меньше кварцевых диоритов и диорит-порфиринов. Вероятнее всего, эти небольшие тела являются апофизами крупной глубинной интрузии, которая отмечается контрастным локальным максимумом Буге амплитудой 6-8 мГал на левом борту р. Козыревка, между ручьями Бурный и Рогатый [1].

Описываемый район перспективен на термоминеральные воды, о чем свидетельствуют их выходы в пойме реки Козыревка. Козыревские источники – это три группы истечений термальных вод на правом берегу с разной температурой в понижениях и ваннах, заполненных водой. Главный выход с температурой 54.5°C имеет рассредоточенный характер. Вдоль русла реки расположена зона растёка вблизи руслового обрыва в виде рассеянных источников с температурой 32-33°C. На левом берегу реки, в пойме, встречены два источника с температурой 17 и 23°C. Они значительно разбавлены водами подруслового стока. Визуально дебит Козыревских источников 2-2.5 л/с, с учётом скрытой разгрузки 7.2 л/с; pH – 7.55. В сухом остатке установлены Cu, Pb, Mo, Ag, Li, Ti, Zr, Sr, Ge. Нижне-Козыревские источники находятся в 4.1 км ниже по реке от Козыревских источников. Суммарные дебиты их 1.0 л/с, температура 22°C, pH 7.4. Воды хлоридно-сульфатные натриево-кальциевые с минерализацией 1.1-1.2 г/дм³, кремнистые (кремнекислоты до 61.1 мг/дм³). В воде обнаружены фтор (до 3 мг/дм³), свинец, молибден, серебро и др. Прогнозные параметры: температура на глубине 2 км – 85°C, потенциальные ресурсы

6.0 тыс. м³/сут¹.

Исходные данные и методы выделения линеаментов

Как известно, линеаментный анализ – это «метод изучения рельефа на континентах и в океане. Состоит в выделении и систематизации линейных элементов при изучении топографических и батиметрических карт. Позволяет проследить зоны разломов, границы между разными комплексами горных пород, выделять узлы пересечения дизъюнктивных нарушений и геоблоки, проследить «теневые» структуры линейного и кольцевого типа».

(https://karpinskyinstitute/public/sprav/geodictionary/article.php?ELEMENT_ID=78368).

Кроме рельефа зоны разломов отражаются по характерным признакам и в геофизических полях – магнитном и гравитационном, а также видны на фотоизображении местности. В исследовании использован весь имеющийся набор данных для рассматриваемой территории: материалы гравиметрической и аэромагнитной съемок масштаба 1:200 000, космический снимок поверхности Landsat [1], радарные снимки рельефа ArcticDEM [2] и SRTM [3].

Выделение линеаментов в геофизических аномалиях и рельефе проведено с помощью программ CET (Centre for Exploration Targeting) анализа сеток цифровых моделей карт. Программы CET созданы в Geophysics and Image Analysis Group (Группа геофизики и анализа изображений) университета Западной Австралии. Программы встроены в виде плагинов в оболочку Geosoft Oasis Montaj.

Анализ космического снимка Landsat проведен с помощью программы pyLEFA 0.61a (Lineament Extraction and Fracture Analysis), разработчик Шевырев С.Л. (<http://lefa.geologov.net>).

Все входные данные (кроме снимка Landsat) приведены в формат grid с шагом между узлами сетки в соответствии с масштабом съемки. Для радарной съемки ArcticDEM шаг входной сетки разрежен до 10 м.

Плагины CET анализа сетки содержат инструменты для *анализа текстур, определения линеации, векторизации линеации и структурной сложности*. Это универсальные алгоритмы анализа текстуры сетки, определения линеаментов, границ, нахождения пороговых значений и выявления областей по степени структурной сложности. Определение тренда и обнаружение неоднородностей в магнитных и гравитационных данных проводится пошагово, с помощью специального меню. Это меню содержит два разных подхода к оценке тренда (*Текстурные выступы и Края*). Последовательным применением упомянутых выше инструментов анализа грид-файлов для исследуемой территории создаются схемы линеаментов по каждому методу отдельно

¹Барбашинов Г.А. Отчет о гидрогеологической съемке масштаба 1:200 000, проведенной Хинарской партией на восточной половине листа N-57-II и на листе N-57-III в 1977-1979 гг. 1981.

(рис. 2-5). Далее схемы сводятся в единую карту линеаментов (рис. 6), которая используется для создания объемной модели.

Для исследования текстуры входной сетки данных проводится вычисление энтропии и стандартного отклонения в скользящем окне. Энтропия измеряет в наборе данных статистическую случайность значений данных в некоторой окрестности. Сначала данные квантуются в отдельные ячейки (i), а затем анализируется общее количество различных значений, полученных в результате этого квантования, формируется гистограмма и вычисляется энтропия по формуле:

$$E = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i$$

где вероятность p получается после нормализации гистограммы n ячеек.

Выходная сетка содержит значения, указывающие на величину случайности, проявляемую текстурой в окрестности вокруг каждой ячейки. Участки территории с высокой статистической случайностью обладают высоким уровнем энтропии, участки с небольшим уровнем случайности имеют низкую энтропию.

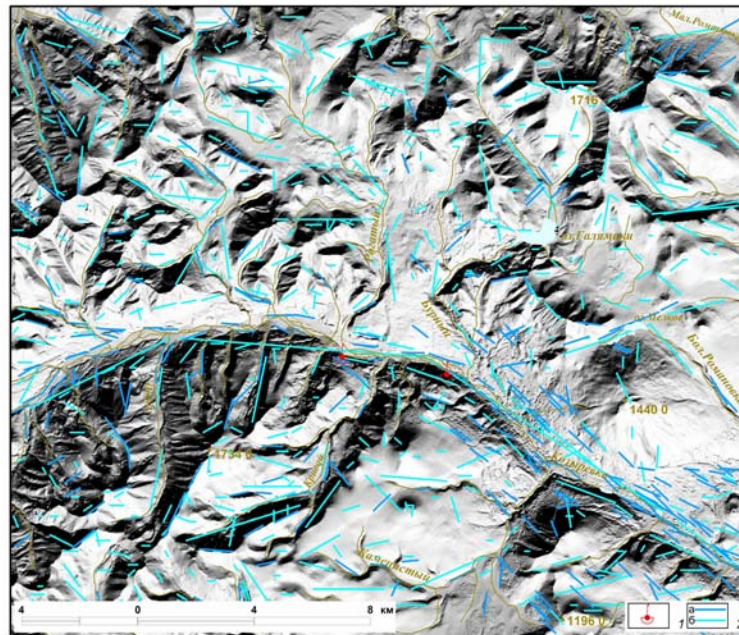


Рис. 2. Линеаменты, выделенные по данным радарных съемок: 1 – термальные источники; 2 – линеаменты: модель рельефа ArcticDEM (а), модель SRTM (б)

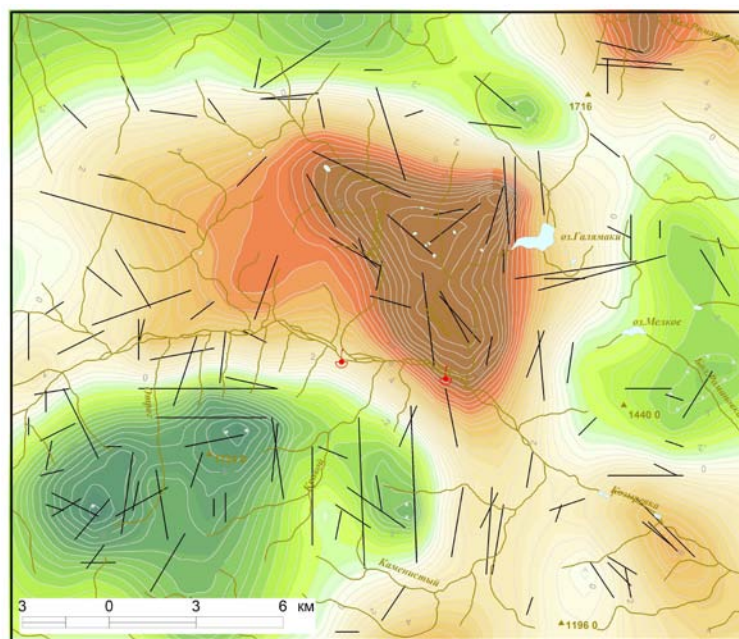


Рис. 3. Линеаменты, выделенные по локальным аномалиям Буге

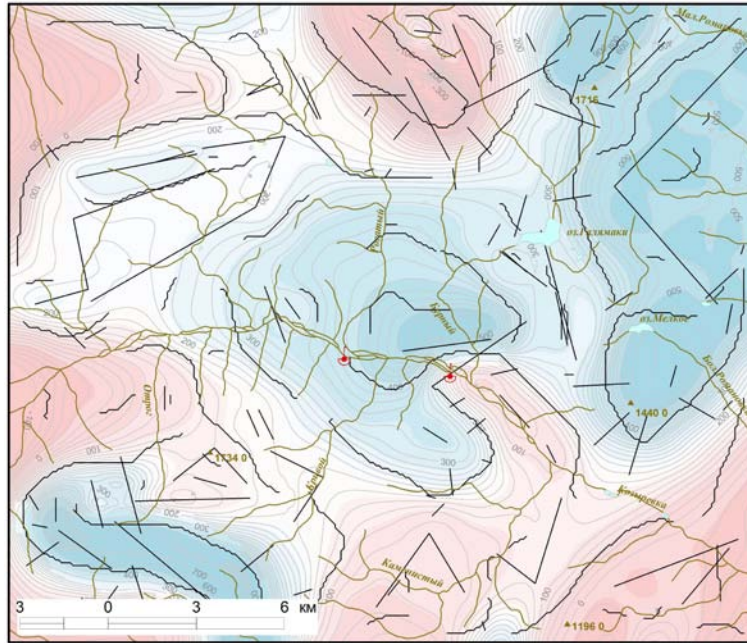


Рис. 4. Линеаменты, выделенные по аномалиям магнитного поля (ΔT)а

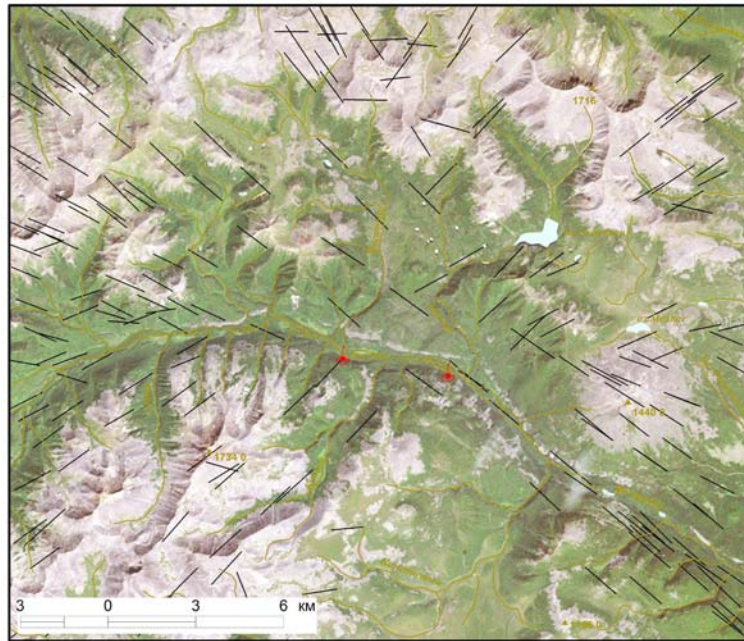


Рис. 5. Линеаменты, выделенные по КС Landsat

Стандартное отклонение предоставляет оценку локального изменения входных данных. Для каждого местоположения вычисляется стандартное отклонение данных в пределах локальной окрестности. Значимые признаки проявляют высокую изменчивость по отношению к фоновому сигналу. Для окна, содержащего N ячеек, среднее значение которых равно μ , стандартное отклонение σ от значений ячеек x_i задается формулой:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$$

В выходных данных значения, приближающиеся к нулю, указывают на очень малую вариацию, тогда как большие значения указывают на высокую вариацию.

На следующем этапе обработки проводится выявление линейных элементов в структуре исследуемых данных – *линеация*. Т.к. любая линия является симметричной в поперечном направлении, то для обнаружения объектов, похожих на линии, в выходных данных определяются оси симметрии методами фазовой симметрии и фазовой конгруэнтности. Эти методы, основанные на анализе фазы сигнала, обеспечивают обнаружение объектов, не зависящих от контраста. Симметрия сигнала связана с периодичностью его пространственной частоты.

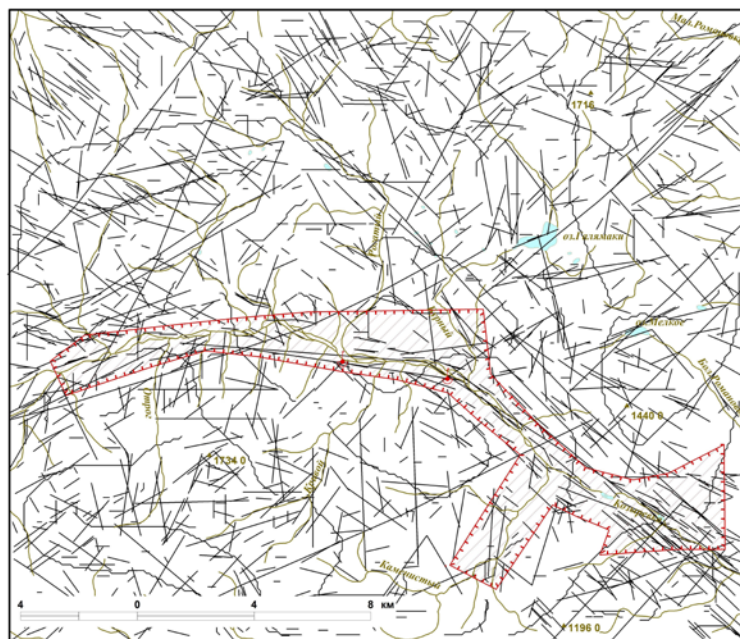


Рис. 6. Обобщенная схема линеаментов. Красной зубчатой линией показана площадь, рекомендуемая для проведения поисковых геофизических исследований

Для нахождения точек симметрии двумерные данные разбиваются на одномерные профили и анализируются по нескольким направлениям в различных масштабах. Фазовая симметрия выделяет зоны, которые, вероятно, содержат оси симметрии, а фазовая конгруэнтность определяет местонахождение вероятных граничных объектов путем определения точек, где локальные пространственные частоты совпадают по фазе (границы ступеней магнитных и гравитационных аномалий).

На следующем этапе проводится *векторизация* выявленных структур методом подбора и создание шейп-файлов линий. Теория и алгоритмы обработки цифровых моделей (сеток) подробно описаны в работах [4,5,6,7,8,9]. Результаты исследования приведены на рисунках 2-5.

Космический снимок Landsat был обработан с помощью программы PyLEFA (Lineament Extraction Fracture Analysis). PyLEFA – аналитическое программное обеспечение дистанционного зондирования с графическим интерфейсом для обнаружения линеаментов и анализа трещин. Эта программа свободного распространения позволяет выявлять на спутниковом изображении местности линеаменты, вычислять параметры пространственного распределения объектов: плотность линеаментов, обнаруживать разломы путем соединения линеаментов и экспортировать объекты в формат shape-файлов для продолжения работы в другом программном обеспечении, например ГИС. Алгоритм и технология обработки снимков приведены в работе [10]. Выявленные линеаменты представлены на рисунке 5.

После редактирования shape-файлов и удаления дублирующих и заведомо ложных линеаментов, образованных за счет краевых эффектов (ограничения

территории исследования скользящим окном) вдоль рамки исследованной площади, была синтезирована сводная схема линеаментов (рис. 6). Дополнительно на схему вынесены разломы, отраженные на геологической карте м-ба 1:200000 [1]. Эта схема далее была использована для построения объемной модели раздробленности коры по специальной методике (см. ниже).

Методика объемного моделирования проницаемости земной коры

Проницаемость геосреды – это «...свойство горных пород пропускать при перепаде давления газы и жидкости благодаря наличию в ней сообщающихся пор, трещин и др. пустот...».

https://karpinskyinstitute.ru/ru/public/sprav/geodictionary/article.php?ELEMENT_ID=83906.

Очевидно, что проницаемость во многом является следствием тектонических процессов, приводящих к образованию трещин, размеров этих трещин и их количества вокруг образующихся разломов. Часть окружающего разлом (магистральный шов) пространства является областью динамического влияния разлома (ОДВР) [11].

Линеаменты, выделяемые на фото и радарных снимках рельефа, геофизических аномалиях, отождествляются с разломами, характеризуют раздробленность участка коры. Отдельные трещины, из которых состоят ОДВР, их ширина не определяется, также как и глубина проникновения разломов. Линеаменты, по сути, отражают только осевые линии ОДВР. В «геофизических» линеаментах могут быть представлены скрытые разломы, например древние разломы в фундаменте или пологие разломы на глубине, трещиноватость на контакте интрузий с вмещающей средой. На радарных снимках

рельефа высокого разрешения линеаменты могут отражать контракционную, литогенетическую трещиноватость. Все вместе это формирует раздробленность исследуемого участка земной коры. На схеме (рис. 6) отображены проекции линеаментов на плоскость, выявленные по разным данным. Количественный пространственный анализ этих линеаментов позволяет прогнозировать вероятные пути миграции подземных вод.

Подробно алгоритм пространственной количественной оценки изложен в [12,13]. Суть метода состоит в разбиении исследуемого блока коры на элементарные кубические ячейки, для которых определяется коэффициент раздробленности геосреды. Деформация макроскопического уровня любого объема земной коры есть сумма деформаций составляющих его многочисленных объемов. Ю.В. Нечаевым [14] на образцах различных горных пород установлено эмпирическое правило – трещиноватость, видимая на одной грани кубика породы, адекватно отражает степень трещиноватости всего образца. Допускаем, что это правило с учетом принципа подобия (объекты, обладающие подобием физических переменных и геометрии подобны), можно применить для количественной оценки трещиноватости кубического блока земной коры, верхняя грань которого расположена на дневной поверхности. Коэффициент раздробленности единичного куба (K_p) равен объему всех трещин внутри него, поделенному на объем куба. Объем трещин равен сумме произведений длины, ширины и глубины проникновения. Из всех отмеченных параметров по линеаментам, отождествляемым с разломами, можно определить только их длину на верхней грани куба. Ширина и глубина остаются неизвестными. Но если для конкретной локализованной (с однотипной геологией) территории принять ширину, равной некоторой постоянной средней величине, например 1, а глубину считать равной величине ребра куба, тогда коэффициент раздробленности будет равен сумме длин линеаментов верхней грани, поделенной на ее площадь. Определенная таким образом величина равна *удельной длине линеаментов* (УДЛ). Также, считая реологические свойства внутри куба однородными, полученная величина УДЛ относится к любой точке внутри заданного объема, в том числе центру куба. Изменяя размер элементарного куба, можно изменять глубину исследований. Определенные таким образом УДЛ для разных горизонтов (кубов разного размера) используются для создания объемной модели раздробленности геосреды изучаемого блока.

Схема нахождения УДЛ выглядит следующим образом: карта линеаментов разбивается на квадраты, которые являются верхними гранями элементарных кубов. Внутри квадратов вычисляется сумма длин отрезков линеаментов и делится на площадь

квадрата. Далее определяются координаты центров верхней грани и глубина центра куба, равная половине длины его ребра. Т.к. исследуемый участок расположен в горной местности, то вводится поправка в координату глубины центра куба на реальную высоту центра верхней грани. Из полученных значений координат и УДЛ создается файл в базе данных. На следующем этапе размер квадратов увеличивается и все процедуры повторяются. Вычисления продолжают до достижения заданной глубины исследования. Все расчеты проводятся в системе плоских координат СК-42. Данные из созданной базы интерполируются методом 3D-кригинга и формируется объемное изображение раздробленности исследованного блока земной коры. Подробно методика расчетов приведена в [15].

Результаты исследований и обсуждение

Объемная модель раздробленности представляет собой совокупность кубических блоков с различной величиной УДЛ. Блок-диаграмма раздробленности исследованного участка земной коры представлена на рисунке 7. На рисунках 8-9 изображены срезы модели на горизонтах 0 и -1000 от уровня моря, а на рисунке 10 разрез по линии Т2. Как видно на представленной графике, изученный район весьма неоднороден по степени раздробленности геологической среды как по латерали, так и на глубину. Это предполагает и значительное различие проницаемости в разных местах территории. Величина УДЛ изменяется в широких пределах – от 0.1 до 7 ед. Абсолютно целых блоков нет. Характерно мозаичное чередование разрушенных и относительно мало раздробленных блоков. Многие наиболее раздробленные блоки расположены в виде цепочек, сливаются на глубине в единые узлы и зоны. Максимальная раздробленность наблюдается в самом верхнем слое от дневной поверхности до глубины примерно 500-700 метров ниже уровня моря. Отчасти это обусловлено тем, что кроме тектонических, магматических факторов разрушения горных пород в верхнем слое добавляется еще влияние процессов «выветривания», которые вносят свою долю в раздробленность среды и проявляются в рельефе как линеаменты. Эта особенность хорошо видна при последовательном просмотре горизонтальных срезов вглубь от дневной поверхности. Наибольшая удельная плотность линеаментов отмечается в долине реки Козыревка, выше и ниже по течению от известных термальных источников. Аномальная раздробленность на этих участках, а также в источках ручья Рогатый прослеживается в вертикальной плоскости более чем на 3 км. По таким зонам вероятно проникновение метеорных (атмосферных) вод на глубину, также как и встречная миграция глубинных магматогенных вод и флюидов к приповерхностным горизонтам. На горизонтальных срезах, особенно на глубине 1 и 2 км ниже уровня моря,

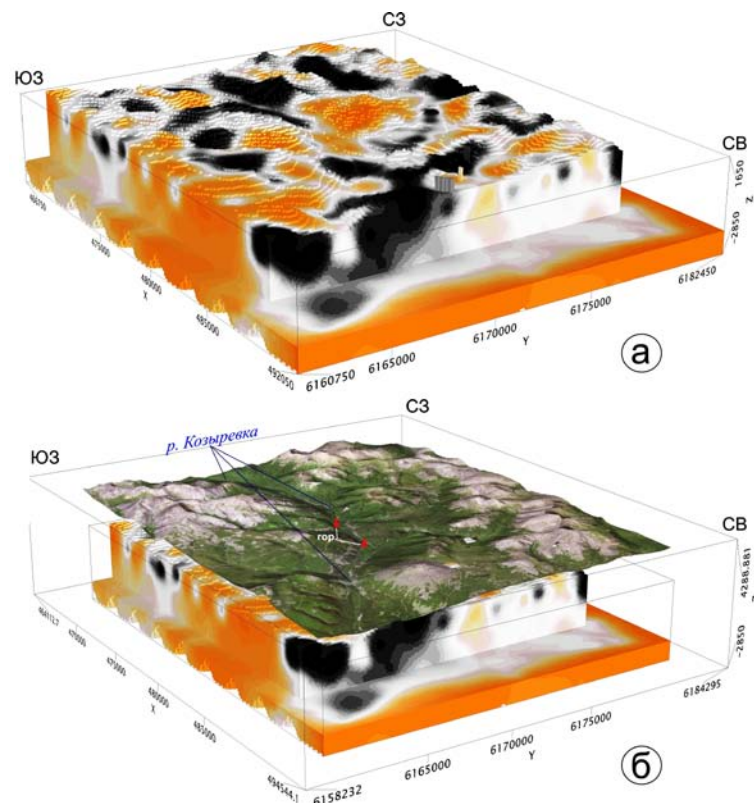


Рис. 7. Общий вид объемной модели раздробленности в верхнем течении реки Козыревка, вид с юго-востока (а), то же с фрагментом КС Landsat (б). Часть ячеек погашена, на рисунке (б) рельеф приподнят на 2 км. Красные точки – термальные источники. Шкала степени раздробленности приведена на рис. 8

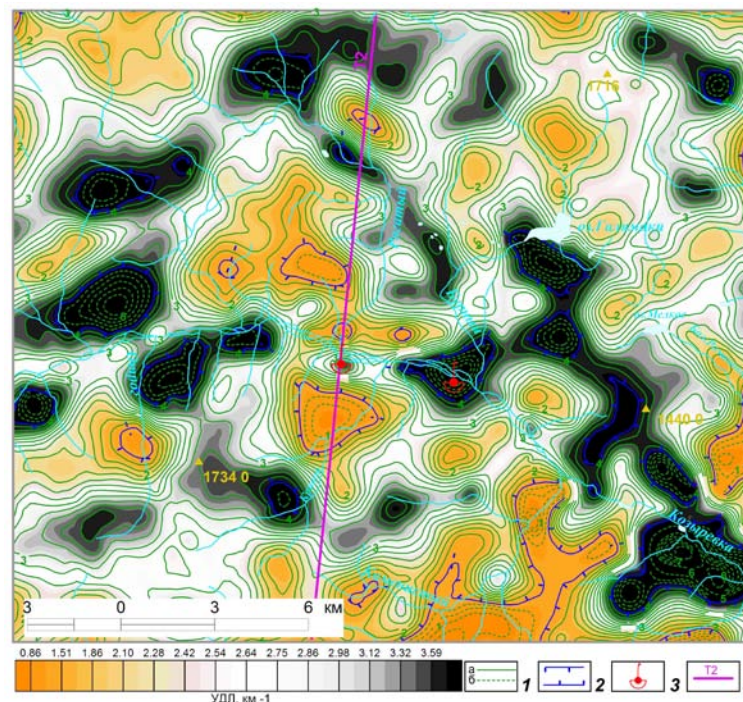


Рис. 8. Горизонтальный срез модели раздробленности коры на уровне моря

1 – изолинии УДЛ, км^{-1} внутри перспективных участков (а), за пределами перспективных участков (б); 2 – границы перспективных на термоминеральные воды переходных зон между сильно и слабо раздробленными блоками. Границы проведены по среднему в срезе (разрезе) значению УДЛ $\pm$ дисперсия; 3 – выходы термальных вод на дневной поверхности; 4 – линия разреза

видно, что раздробленные блоки образуют кольцеобразную структуру, в центре которой расположен относительно «целый» блок овальной формы. В гео-

физических полях этот блок отражается локальным максимумом аномалии Буге и магнитной аномалией интенсивностью 500 нТл (рис. 3-4).

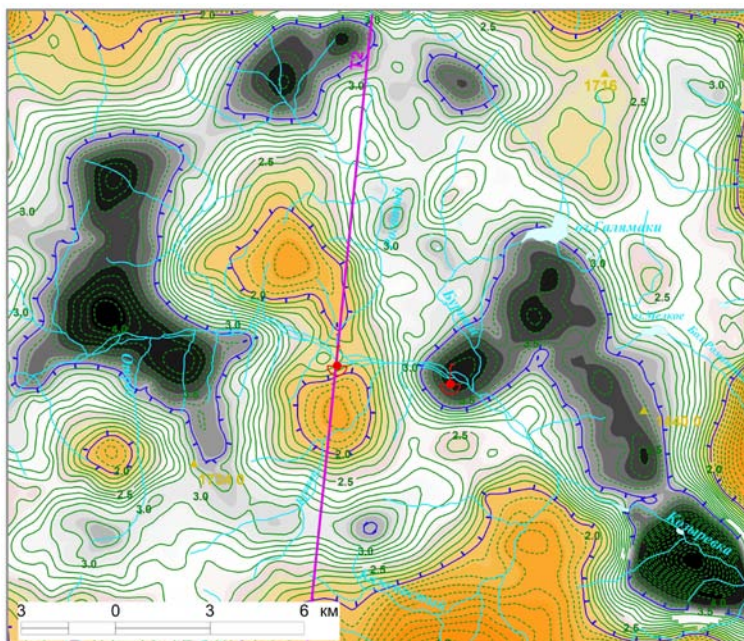


Рис. 9. Горизонтальный срез модели раздробленности коры на горизонте 1000 м ниже уровня моря. Условные обозначения на рис. 8

Такое сочетание аномалий дает основание предположить в этом месте на глубине массивную интрузию. Определение центра масс методом особых точек показывает глубины в интервале 6.5-8.1 км ниже уровня моря. В экзоконтактной зоне этого интрузива и наблюдается повышенная раздробленность геологической среды. Возможно, что интрузив – это «бывший» периферический вулканический очаг, заполненный магмой преимущественно среднего состава. Косвенно об этом свидетельствуют выходы небольшой интрузии диоритов-гранодиоритов лавкинского магматического комплекса (рис. 1). Интрузия, обнаженная севернее известных термоминеральных проявлений, при впадении в реку Козыревку ручьев Рогатый и Бурный, вероятно является апофизой от отмеченной геофи-

зическими аномалиями. Глубинная интрузия является потенциальным источником горячих магматогенных вод, которые фильтруются к поверхности по раздробленным зонам, смешиваются с метеорными водами и образуют известные гидротермы. Вполне возможно, что часть термальных вод разгружается в слое рыхлых отложений в долине р. Козыревка.

Другим источником тепла и горячих магматогенных вод могут служить корневые части (питающие системы) дацитовых экструзий дыгеренского вулканического комплекса (рис. 1). Экструзивные купола расположены на правом борту р. Козыревка, южнее термопроявлений, в периферической части Правокозыревского палеовулкана [1].

Вулканоструктура (ВС) расположена в междуречье Козыревка – Сухарики и представляет собой

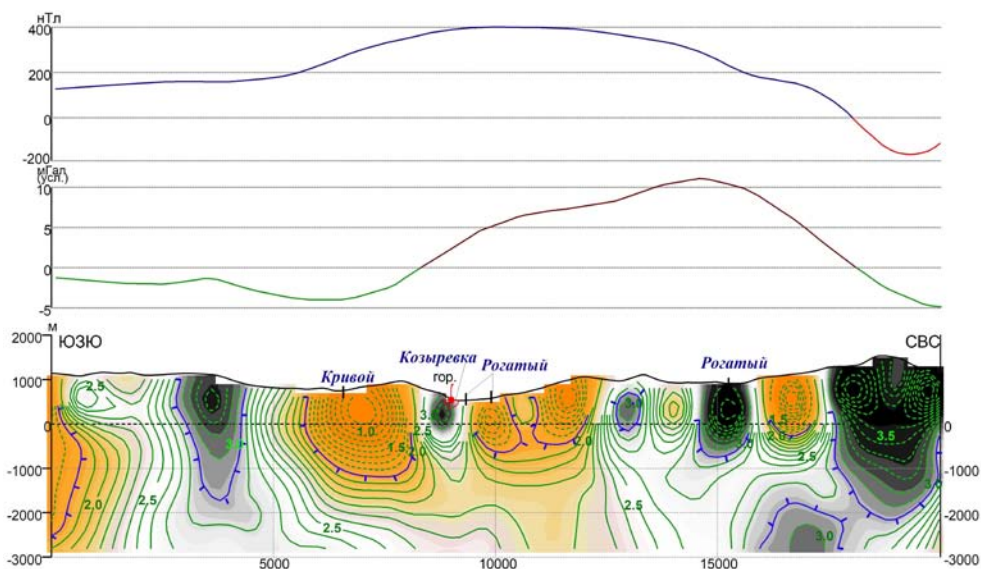


Рис. 10. Разрез модели раздробленности по линии Т2. Условные обозначения на рис. 8

щитовую постройку, сложенную базальтами срединного комплекса. Центр структуры идентифицируется жерловиной базальтовых агглютинатов, находящейся в районе высоты 1734 м (рис. 1). На юго-восточном склоне ВС расположены неоплейстоценовые экструзии дацитов дыгеренского комплекса и многочисленные голоценовые шлаковые конусы базальтового состава [1]. Механизм фильтрации подземных вод аналогичен вышеописанному.

Проведенный линеаментный анализ в других геотермальных районах Камчатки и Курильских островов (бассейны рек Паратунки, Налычева, а также на островах Парамушир и Итуруп [16,17,18] выявил пространственную закономерность – выходы термальных вод на дневную поверхность расположены в краевых частях блоков с аномально высокой раздробленностью, в зоне перехода к слабо раздробленным блокам, которые, как правило, содержат внутри интрузии и экструзии [18]. Была установлена статистическая зависимость – большинство источников на дневной поверхности находятся в зонах с краями, расположенными на расстоянии $\pm$ дисперсия от средних линий (значений) УДЛ. Следуя этому правилу, на срезах (рис. 8-9) и разрезе (рис. 10) объемной модели проведены границы (зубчатая линия) перспективных участков, где наиболее вероятно обнаружение термоминеральных вод. На рис. 7 показаны границы наиболее перспективной площади для исследований электропроводности геосреды методом МТЗ до глубины 3-5 км в комплексе с тепловизионной съёмкой. Такой поисковый комплекс методов позволит локализовать участки для бурения гидрогеологических скважин.

Заключение

Созданная объемная модель раздробленности верхней части земной коры в бассейне р. Козыревка

показала значительную изменчивость геосреды по степени проницаемости. Кора разбита на отдельные блоки, контрастно отличающиеся друг от друга раздробленностью горных пород. Наибольшая раздробленность характерна для приповерхностного слоя. От дневной поверхности до глубины 500-700 м ниже уровня моря в модели наблюдается хаотично-мозаичное расположение раздробленных и относительно целых блоков. В центральной части исследованной территории по мере углубления отдельные блоки постепенно сливаются в единую кольцеобразную раздробленную зону шириной 3-5 км. В середине этой кольцеобразной структуры расположен относительно слабо раздробленный блок овальной формы, который в геофизических полях выражен комплексной аномалией (максимумами) Буге и магнитного поля. Аномалия отражает массивную интрузию гранодиоритов с центром масс на глубине 6.5-8.1 км. Интрузия является источником горячих магматогенных вод, которые по проницаемой кольцевой зоне мигрируют к поверхности, где, смешиваясь с метеорными водами, образуют известные гидротермы.

Другим источником тепла могут служить корневые части (питающие системы) дацитовых экструзий дыгеренского вулканического комплекса, расположенные на правом борту р. Козыревка.

В аспекте поисков термоминеральных вод наиболее перспективными следует считать места сочленения раздробленных и относительно целых блоков в понижениях рельефа – долинах рек и ручьев. Локализация участков для поискового бурения гидрогеологических скважин возможна после проведения электроразведочных исследований методом магнитотеллурических зондирования (МТЗ) до глубины 3-5 км в комплексе с тепловизионной съёмкой.

Список литературы

1. Хасанов Ш.Г., Сидоренко В.И., Боровцов А.К., Сляднев Б.И., Родных Н.А., Николаева В.И. ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Западно-Камчатская. Лист N-57-III (Эссо). СПб., 2007.
2. Digital elevation model ArcticDEM. URL: http://ArcticDEM/mosaic/v3.data.pgc.umn.edu/elev/dem/setsm0/2m/76_25.
3. Digital elevation model SRTM. URL: https://www.okmap.org/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/N55E158.hgt.zip.
4. Eun-Jung Holden, Dentith M., Kovesi P. Towards the Automatic Analysis of Regional Aeromagnetic Data to Identify Regions Prospective for Gold Deposits. Computers & Geosciences. 2008. V. 34. No. 11. Pp. 1505-1513. URL: www.sciencedirect.com/journal/computers-and-geosciences/vol/34/issue/11.
5. Eun-Jung Holden, M. Dentith and P. Kovesi, «Towards the Automatic Analysis of Regional Aeromagnetic Data to Identify Regions Prospective for Gold Deposits». Computers & Geosciences. V. 34. No. 11. Pp. 1505-1513. 2008.
6. Eun-Jung Holden, P. Kovesi, M. Dentith, D. Wedge, J.C. Wong and S.C. Fu «Detection of Regions of Structural Complexity within Aeromagnetic Data using Image Analysis». Twenty Fifth International Conference of Image and Vision Computing New Zealand. 8-9 November 2010.
7. L. Lam and S.-W. Lee and C.Y. Suen «Thinning Methodologies-A Comprehensive Survey». IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. V. 14. No. 9. Pp. 879. September 1992.
8. Peter Kovesi «Image features from phase congruency». Videre: Journal of Computer Vision Research. Summer 1991. V. 1. No. 3. The MIT Press.
9. Peter Kovesi «Symmetry and asymmetry From local phase». AI'97, Tenth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence. 2-4 December 1997.
10. Шевырев С.Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab // Успехи современного естествознания. 2018. №10. С. 138-143.
11. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. Новосибирск: Наука. 1983. 112 с.
12. Таскин В.В., Сидоров М.Д. Трехмерная модель тектонической раздробленности земной коры, созданная с использованием космической видеoinформации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. №2. С. 243-252.

13. Таскин В.В., Сидоров М.Д. Алгоритм создания трехмерной модели тектонической раздробленности в среде ГИС по результатам дешифрирования аэро- и космоснимков, оценка ее достоверности // Геоинформатика. 2015. №1. С. 21-27.
14. Нечаев Ю.В. Линеаменты и тектоническая раздробленность. Дистанционное изучение внутреннего строения литосферы. М.: ИФЗ РАН. 2010. 215 с.
15. Сидоров М.Д. Создание базы данных для объемного изображения тектонической раздробленности земной коры // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. №12 (специальный выпуск 17). С. 60-73. DOI:10.25018/0236_1493_2023_12_17_60.
16. Хубаева О.Р., Сергеева А.В., Хомчановский А.Л., Сидоров М.Д., Батанов Ф.И., Волюнкин С.С., Назарова М.А. Генезис термального озера в прибрежной зоне о. Итуруп (Курильские острова) // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16. №1. С. 813-830. DOI:10.5800/GT-2025-16-1-0813.
17. Khubaeva O.R., Bergal-Kuvikasa O.V. and Sidorov M.D. The Formation and Recharge of the Verkhne-Yuriev Thermal Springs, Paramushir Island, Kuril Islands. Pleiades Publishing, Ltd. Journal of Volcanology and Seismology. 2022. No. 16(3). Pp. 206-220. DOI:10.1134/S0742046322030034.
18. Sidorov M.D., Taskin V.V. The Study of the Permeability of the Upper Crust Part on the Photo Image of the Surface in the Area of the Nalychevo Field of Thermomineral Waters (Kamchatka). IOP Publishing, 2nd International Geothermal Conference, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 249 (2019) 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012046>.

References

1. Khasanov Sh.G., Sidorenko V.I., Borovtsov A.K., Slyadnev B.I., Rodnykh N.A., Nikolayeva V.I. *GOSUDARSTVENNAYA GEOLOGICHESKAYA KARTA ROSSIYSKOY FEDERATSII masshtaba 1:200 000* [State Geological Map of the Russian Federation, Scale 1:200,000]. Second edition. West Kamchatka Series. Sheet N-57-III (Esso). St. Petersburg. 2007.
2. Digital elevation model ArcticDEM. URL: http://ArcticDEM/mosaic/v3.data.pgc.umn.edu/elev/dem/sets/m0/2m/76_25.
3. Digital elevation model SRTM. URL: https://www.okmap.org/srtm/version2_1/SRTM3/Eurasia/N55E158.hgt.zip.
4. Eun-Jung Holden, Dentith M., Kovesi P. Towards the Automatic Analysis of Regional Aeromagnetic Data to Identify Regions Prospective for Gold Deposits. Computers & Geosciences. 2008. V. 34. No. 11. Pp. 1505-1513. URL: www.sciencedirect.com/journal/computers-and-geosciences/vol/34/issue/11.
5. Eun-Jung Holden, M. Dentith and P. Kovesi, «Towards the Automatic Analysis of Regional Aeromagnetic Data to Identify Regions Prospective for Gold Deposits». Computers & Geosciences. V. 34. No. 11. Pp. 1505-1513. 2008.
6. Eun-Jung Holden, P. Kovesi, M. Dentith, D. Wedge, J.C. Wong and S.C. Fu «Detection of Regions of Structural Complexity within Aeromagnetic Data using Image Analysis». Twenty Fifth International Conference of Image and Vision Computing New Zealand. 8-9 November 2010.
7. L. Lam and S.-W. Lee and C.Y. Suen «Thinning Methodologies-A Comprehensive Survey». IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. V. 14. No. 9. Pp. 879. September 1992.
8. Peter Kovesi «Image features from phase congruency». Videre: Journal of Computer Vision Research. Summer 1991. V. 1. No. 3. The MIT Press.
9. Peter Kovesi «Symmetry and asymmetry From local phase». AI'97, Tenth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence. 2-4 December 1997.
10. Shevyrev S.L. Lefa software: an automatized structural analysis of remote sensing imagery in matlab environment. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2018. No. 10. Pp. 138-143.
11. Sherman S.I., Boryakov S.A., Buddo V.Yu. *Oblasti dinamicheskogo vliyaniya razlomov* [Zones of dynamic fault influence]. Novosibirsk: Nauka. 1983. 112 p.
12. Taskin V.V., Sidorov M.D. 3-D model of tectonic break of Earth crust created using satellite optical data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014. V. 11. No. 2. Pp. 243-252.
13. Taskin V.V., Sidorov M.D. The algorithm of three-dimensional model creation in the environment of GIS with results of aerospace image decipherment exploitation, evaluation of it reliability. *Geoinformatika*. 2015. No. 1. Pp. 21-27.
14. Nechayev Yu.V. *Lineamenty i tektonicheskaya razdroblennost'. Distantsionnoye izucheniye vnutrennego stroyeniya litosfery* [Lineaments and Tectonic Fragmentation: Remote Sensing Study of the Lithosphere's Internal Structure]. Moscow: IFZ RAN. 2010. 215 p.
15. Sidorov M.D. Creating a database for three-dimensional image of the earth crust tectonic fragmentation. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2023. No. 12 (spetsial'nyy vypusk 17). Pp. 60-73. DOI:10.25018/0236_1493_2023_12_17_60.
16. Khubaeva O.R., Sergeeva A.V., Khomchanovsky A.L., Sidorov M.D., Batanov F.I., Volynkin S.S., Nazarova M.A., 2025. The Genesis of the Thermal Lake Located Within the Coastal Area of Iturup Island (The Kurils). *Geodinamika i tektonofizika*. 2025. V. 16. No. 1. Pp. 813-830. DOI:10.5800/GT-2025-16-1-0813.
17. Khubaeva O.R., Bergal-Kuvikasa O.V. and Sidorov M.D. The Formation and Recharge of the Verkhne-Yuriev Thermal Springs, Paramushir Island, Kuril Islands. Pleiades Publishing, Ltd. Journal of Volcanology and Seismology. 2022. No. 16(3). Pp. 206-220. DOI:10.1134/S0742046322030034.
18. Sidorov M.D., Taskin V.V. The Study of the Permeability of the Upper Crust Part on the Photo Image of the Surface in the Area of the Nalychevo Field of Thermomineral Waters (Kamchatka). IOP Publishing, 2nd International Geothermal Conference, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 249 (2019) 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012046>.

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Сидоров Михаил Дмитриевич

кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, 683002, Петропавловск-Камчатский, Россия

Information about authors Affiliations

Sidorov Mikhail Dmitrievich

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, Scientific Research Geotechnological Centre, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 683002, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Поступила в редакцию 11.08.2026 г.

ЗОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ ПО УРОВНЮ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ РИСКОВ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ ОТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ В ПЕРМСКОМ КРАЕ

Столяров В.М., Лепехин П.П., Груздев В.С., Морковкин Г.Г., Кочетов Я.С.
Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия
e-mail: stolyarovvm@guz.ru

В статье представлена усовершенствованная методика зонирования территории Пермского края по уровню эколого-экономических рисков деградации земель, обусловленной воздействием промышленных источников. Методика базируется на интегральной оценке трех групп факторов: техногенной нагрузки (масса выбросов, класс опасности веществ, расстояние до источника), уязвимости природной среды (механический состав почв, кислотность, глубина залегания грунтовых вод, эрозийная опасность) и экономической ценности земель (кадастровая стоимость, категория земель, плотность населения, инвестиционная привлекательность). На основе ГИС-анализа с разрешением 100 м выделены зоны критического, высокого, среднего и низкого риска. Определено, что наибольшая площадь земель с критическим риском (6.2% от территории края) приурочена к промышленным узлам городов Пермь, Березники, Соликамск и Чайковский. Разработана матрица приоритетности природоохранных мероприятий в зависимости от сочетания уровня риска и категории земель. Результаты зонирования могут быть использованы при формировании региональных программ рекультивации, установлении дифференцированных платежей за негативное воздействие и корректировке схем территориального планирования.

Ключевые слова: зонирование территории, эколого-экономические риски, деградация земель, промышленные источники, Пермский край, землеустройство, ГИС-анализ, загрязнение почв, рекультивация земель, устойчивое землепользование, кадастровая оценка.

TERRITORY ZONING BY THE LEVEL OF ECOLOGICAL AND ECONOMIC RISKS OF LAND DEGRADATION FROM INDUSTRIAL SOURCES IN PERM KRAI

Stolyarov V.M., Lepekhin P.P., Gruzdev V.S., Morkovkin G.G., Kochetov Ya.S.
State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

The article presents an improved methodology for zoning the territory of Perm Krai by the level of ecological and economic risks of land degradation caused by industrial sources. The methodology is based on an integrated assessment of three groups of factors: technogenic load (mass of emissions, hazard class of substances, distance to the source), vulnerability of the natural environment (soil texture, acidity, groundwater depth, erosion hazard) and economic value of lands (cadastral value, land category, population density, investment attractiveness). Based on GIS analysis with a resolution of 100 m, zones of critical, high, medium and low risk have been identified. It is determined that the largest area of lands with critical risk (6.2% of the region's territory) is confined to the industrial hubs of Perm, Berezniki, Solikamsk and Tchaikovsky. A matrix of priority of environmental measures has been developed depending on the combination of risk level and land category. The zoning results can be used in the formation of regional reclamation programs, establishment of differentiated payments for negative impact and adjustment of territorial planning schemes.

Keywords: territory zoning, ecological and economic risks, land degradation, industrial sources, Perm Krai, land management, GIS analysis, soil pollution, land reclamation, sustainable land use, cadastral valuation.

Введение

Пермский край является одним из наиболее промышленно развитых регионов Российской Федерации. На его территории расположены крупные предприятия нефтехимического, нефтеперерабатывающего, машиностроительного, горно-химического и оборонного комплексов: ПАО «Лукойл-Пермнефтеоргсинтез», АО «Пермский пороховой завод», ПАО «Уралкалий», АО «Метафракс», Пермская ГРЭС и другие. Совокупный объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников в крае ежегодно превышает 300 тыс. тонн, при этом значительная часть загрязнителей (тяжелые металлы, оксиды серы и азота, бенз(а)пирен, фенолы) оседает на поверхность почвы и приводит к ее деградации. Согласно данным госу-

дарственного мониторинга, за последние пять лет площадь земель с превышением предельно допустимых концентраций (ПДК) по тяжелым металлам увеличилась на 17%, что свидетельствует о нарастании экологической напряженности [1].

Под деградацией земель в контексте данной статьи понимается ухудшение физических, химических и биологических свойств почв, вызванное техногенным воздействием, что влечет снижение продуктивности угодий, утрату экологических функций и экономический ущерб. Для обоснованного принятия управленческих решений (консервация земель, рекультивация, изменение режима использования) необходимо зонирование территории по уровню эколого-экономических рисков. Однако существующие подходы либо учитывают только

экологическую составляющую (загрязнение), либо носят сугубо экономический характер (величина ущерба) [2]. Кроме того, большинство методик не учитывают пространственную неоднородность уязвимости почвенного покрова и экономическую дифференциацию земель. Актуальной задачей является разработка комплексного метода, объединяющего оба аспекта применительно к условиям Пермского края.

Цель и задачи исследования

Цель работы – разработать и апробировать методику зонирования территории Пермского края по уровню эколого-экономических рисков деградации земель от промышленных источников.

Задачи:

1. Определить перечень приоритетных загрязняющих веществ и промышленных источников для исследуемого региона.
2. Выбрать критерии и построить интегральные индексы техногенной нагрузки, уязвимости природной среды и экономической ценности земель.
3. Выполнить ГИС-зонирование с выделением четырех категорий риска.
4. Проанализировать распределение земель различных категорий по зонам риска.
5. Разработать матрицу приоритетности мероприятий по снижению эколого-экономических рисков.
6. Оценить экономический эффект от внедрения результатов зонирования.

Материалы и методы

Исходными данными послужили: статистические сборники «Охрана окружающей среды в Пермском крае» за 2020-2024 гг.; данные территориального органа Росгидромета о загрязнении почв; сведения Единого государственного реестра недвижимости (ЕГРН) о кадастровой стоимости земельных участков; цифровая карта почв Пермского края масштаба 1:500 000; данные спутникового мониторинга (Sentinel-2, разрешение 10 м) для уточнения границ промышленных зон и состояния растительного покрова; данные ведомственной статистики предприятий о структуре выбросов. Расчеты выполнены в среде ГИС QGIS 3.28

Методика включает последовательные этапы.

1. Выделение промышленных источников и ранжирование по фактору техногенной нагрузки. Для 86 крупных промышленных предприятий (включая объекты малой генерации и котельные) рассчитан индекс техногенной нагрузки (ITL) по формуле:

$$ITL = \sum (M_i \cdot C_i \cdot K_{rem}) / (D^2 + 1),$$

где M_i – масса выброса i -го вещества (т/год), C_i – класс опасности (1 – чрезвычайно опасные, 2 – высокоопасные, 3 – умеренно опасные, 4 – малоопас-

ные), K_{rem} – коэффициент остаточного загрязнения (учитывает стойкость вещества в почве: для тяжелых металлов – 1.0; для нефтепродуктов – 0.8; для оксидов азота – 0.4), D – расстояние от источника до расчетной точки (км). Расчет выполнен для каждого пикселя раstra с пространственным разрешением 100 м с использованием растрового калькулятора. Для моделирования рассеивания загрязнителей применена упрощенная гауссова модель в модификации для равнинной местности.

2. Оценка уязвимости природной среды. Построен индекс уязвимости (IU) на основе шести показателей: тип почв (дерново-подзолистые – наиболее уязвимы, серые лесные – средняя уязвимость, пойменные – наименее уязвимы, по 5-балльной шкале), кислотность почвенного раствора ($pH < 4.5$ – высокая уязвимость, 5 баллов), глубина залегания грунтовых вод (< 3 м – высокая уязвимость, 5 баллов), эрозионная опасность (смыв > 5 т/га в год – 5 баллов), содержание гумуса ($< 2\%$ – 5 баллов), гранулометрический состав (супесчаные и песчаные – максимальная уязвимость). Все показатели нормированы, итоговый индекс IU рассчитан как средневзвешенное с весами, определенными экспертным методом (коэффициент конкордации экспертов – 0.82).

3. Экономическая ценность земель. Индекс ценности (IEC) определен как произведение кадастровой стоимости (руб./га) на коэффициент плотности населения и категории земель (наибольший вес для сельхозугодий и земель населенных пунктов – 1.0; земли промышленности – 0.8; лесные земли – 0.5; земли особо охраняемых территорий – 0.3). Дополнительно введен поправочный коэффициент инвестиционной привлекательности территории на основе данных о размере капитальных вложений в основной капитал за последние три года.

4. Интегральный эколого-экономический риск (R) рассчитан как:

$$R = ITL \cdot IU \cdot IEC.$$

Полученные значения нормированы в диапазон [0; 100] и методом естественных интервалов разделены на четыре зоны: критический риск ($R > 75$), высокий риск (51-75), средний риск (26-50), низкий риск (0-25).

5. Сценарное прогнозирование. Для оценки динамики рисков при изменении техногенной нагрузки построены три сценария: инерционный (сохранение текущих выбросов), оптимистический (снижение на 20% за счет внедрения наилучших доступных технологий) и пессимистический (рост на 15% в связи с развитием новых производств).

Результаты

Установлено, что зона критического риска занимает 6.2% площади края (около 1 020 км²), зона

высокого риска – 12.4% (2 045 км²), среднего – 28.9% (4 760 км²), низкого – 52.5% (8 645 км²). Пространственно зоны критического риска приурочены к промышленным узлам: Пермский (правобережье Камы в районе Осенцово – Заозеровье), Березниковско-Соликамский (районы калийных производств и солеотвалов), Чайковский (нефтехимический комплекс). В этих зонах фиксируется превышение ПДК по валовому содержанию кадмия в 3-5 раз, свинца – в 2-3 раза, нефтепродуктов – до 8 ПДК.

Таблица 1 представляет собой сводную количественную характеристику четырех выделенных зон эколого-экономического риска, дифференцированных по величине интегрального индекса R, площади распространения, доле от общей территории региона, спектру приоритетных загрязнителей и кратности превышения предельно допустимых концентраций (ПДК). Данный инструментарий позволяет перейти от абстрактной оценки загрязнения к конкретным управленческим решениям.

Таблица построена по принципу профильного анализа: для каждой категории земель проценты в строках дают представление о том, какая доля ее

площади подвержена риску. Сумма процентов по строке равна 100% (с учетом погрешностей округления), что позволяет видеть полный «профиль» категории. Такой подход принципиально важен для принятия управленческих решений, поскольку категории земель имеют различный правовой режим, экономическую ценность и возможности для рекультивации.

Приведены данные по 5 крупнейшим промышленным объектам, суммарная масса выбросов которых составляет 54 800 тонн в год, а совокупный вклад в формирование зоны критического риска достигает 79.6%. Это означает, что практически 4/5 всей критической нагрузки на земли создается всего пятью предприятиями, что является исключительно благоприятным фактором для управления, поскольку позволяет сконцентрировать природоохранные ресурсы на ограниченном числе объектов и достичь максимального эффекта при минимальных административных и финансовых затратах.

Таблица 4 является количественным обоснованием необходимости действий. Она превращает экологическую проблему из разряда «хорошо бы

Таблица 1

Характеристика зон риска деградации земель в Пермском крае

Зона риска	Интегральный индекс R	Площадь, км ²	Доля от территории края, %	Преобладающие загрязнители	Средняя концентрация (кратность ПДК)
Критический	>75	1020	6.2	Cd, Pb, бенз(а)пирен, нефтепродукты	4.2; 2.8; 6.5; 8.1
Высокий	51-75	2045	12.4	Ni, Cu, формальдегид	2.1; 1.9; 3.4
Средний	26-50	4760	28.9	Mn, оксиды азота	1.3; 1.5
Низкий	0-25	8645	52.5	Фоновые концентрации	<0.8

Таблица 2

Распределение земель по категориям в зонах эколого-экономического риска (в % от площади категории)

Категория земель	Критический риск	Высокий риск	Средний риск	Низкий риск
Сельскохозяйственные угодья	11.2	18.5	32.3	38.0
Земли населенных пунктов	23.4	29.1	27.8	19.7
Земли промышленности	42.0	31.5	18.9	7.6
Лесные земли	2.8	9.7	28.4	59.1
Земли особо охраняемых территорий	0.3	4.2	21.5	74.0

Таблица 3

Основные промышленные источники, формирующие зоны критического риска

№	Предприятие	Город	Основной загрязнитель	Масса выброса, т/год	Вклад в формирование зоны критического риска, %
1	ПАО «Лукойл-Пермнефтеоргсинтез»	Пермь	Бенз(а)пирен, SO	18 200	24.3
2	ПАО «Уралкалий»	Березники	Соли, взвешенные вещества	12 500	18.7
3	АО «Метафракс»	Губаха	Метанол, формальдегид	9 800	14.2
4	АО «Пермский пороховой завод»	Пермь	Тяжёлые металлы, NOx	7 400	11.6
5	Пермская ГРЭС	Пермь	Зола, SO	6 900	10.8
Итого по 5 источникам	–	–	–	54 800	79.6

сделать» в разряд «экономически необходимо» – поскольку любое промедление ежегодно стоит региону 6.33 млрд руб. При этом рекультивация всех нарушенных земель требует единовременных затрат 3.28 млрд руб., что окупается менее чем за полтора года. С учетом мультипликативного эффекта (создание рабочих мест, развитие рынка экологических услуг, улучшение здоровья населения) реальная экономическая эффективность вложений может оказаться в 2–3 раза выше расчетной. Предлагаемые меры являются не затратами, а инвестициями в будущее региона с гарантированным высоким возвратом.

Таблица 5 представляет собой управленческую матрицу принятия решений, которая связывает два ключевых параметра: экологическую остроту ситуации (уровень риска) и функциональное назначение земель (категория). В отличие от предыдущих таблиц, где фиксировались результаты диагностики, здесь предложен алгоритм действий – конкретные меры, ранжированные по степени вмешательства

и финансированию. Матрица является логическим завершением трех предыдущих таблиц, поскольку она переводит данные о зонах риска, источниках загрязнения и экономическом ущербе в плоскость практических решений.

Таблица 6 представляет собой прогнозную модель, построенную на основе трех сценариев изменения техногенной нагрузки на территории Пермского края к 2030 году. В отличие от таблиц (1-5), которые фиксируют текущее состояние, эта таблица является инструментом стратегического планирования, позволяющим оценить долгосрочные последствия управленческих решений и выбрать наиболее эффективную политику в области экологической модернизации и землепользования.

Анализ распределения земель по категориям показал, что в зоне критического риска находится 11.2% всех сельскохозяйственных угодий края (преимущественно пашни вокруг г. Перми) и 23.4% земель населенных пунктов в промышленных городах. Экономический ущерб от деградации земель

Таблица 4

Экономическая оценка ущерба от деградации земель по зонам риска

Зона риска	Площадь, км²	Недополученная продукция с.-х., млн руб./год	Затраты на рекультивацию, млн руб.	Суммарный экономический ущерб, млн руб./год
Критический	1020	1 240	1 460	2 700
Высокий	2045	980	1 050	2 030
Средний	4760	720	680	1 400
Низкий	8645	110	90	200
Итого	16470	3 050	3 280	6 330

Таблица 5

Матрица приоритетности природоохранных мероприятий в зависимости от сочетания уровня риска и категории земель

Категория земель / Уровень риска	Критический	Высокий	Средний	Низкий
Сельскохозяйственные угодья	Консервация + рекультивация (срок 3 года)	Фиторемедиация + известкование	Агрохимический мониторинг	Обычный режим
Земли населённых пунктов	Снятие плодородного слоя + отсыпка	Озеленение с барьерной функцией	Контроль пылегазовых выбросов	Экологическое просвещение
Земли промышленности	Техническая рекультивация	Санитарная очистка	Сокращение выбросов НДТ	Производственный контроль
Лесные земли	Запрет рубок + лесовосстановление	Санитарные рубки	Мониторинг состояния древостоя	Плановая охрана
ООПТ	Усиление охранной зоны	Ограничение рекреационной нагрузки	Патрулирование	Регулярный мониторинг

Таблица 6

Прогноз изменения площади зон риска при различных сценариях техногенной нагрузки на 2030 год (в % от территории края)

Сценарий	Критический риск	Высокий риск	Средний риск	Низкий риск
Инерционный	6.2	12.4	28.9	52.5
Оптимистический (снижение выбросов на 20%)	3.8	9.1	26.2	60.9
Пессимистический (рост выбросов на 15%)	9.5	15.8	30.1	44.6

(недополученная продукция сельского хозяйства и затраты на рекультивацию) для зоны критического риска оценен в 2.7 млрд руб. в год, а суммарный по всем зонам – в 6.33 млрд руб. в год.

Сценарное прогнозирование показало, что при оптимистическом сценарии (внедрение НДТ на 20% источников) площадь критического риска сократится до 3.8%, а низкого – вырастет до 60.9%. При пессимистическом – критический риск увеличится до 9.5 %, что потребует дополнительных бюджетных ассигнований на рекультивацию в размере около 1.4 млрд руб. ежегодно.

Обсуждение

Разработанная методика отличается от аналогов [3,4] одновременным учетом трех компонентов: техногенной нагрузки, уязвимости среды и эконо-

мической ценности земель. Это позволяет не только выявить территории с наибольшими экологическими нарушениями, но и определить приоритетность финансирования мероприятий с точки зрения предотвращаемого экономического ущерба. Например, небольшой по площади участок в черте города Перми с критическим риском, но высокой кадастровой стоимостью, требует более срочного вмешательства, чем обширная зона высокого риска в малонаселенной таежной местности.

Введение матрицы приоритетности (таблица 5) дает четкие рекомендации для землеустроительных органов и предприятий, дифференцируя подходы в зависимости от категории земель. Это особенно важно для сельскохозяйственных угодий, где консервация земель без рекультивации может привести к

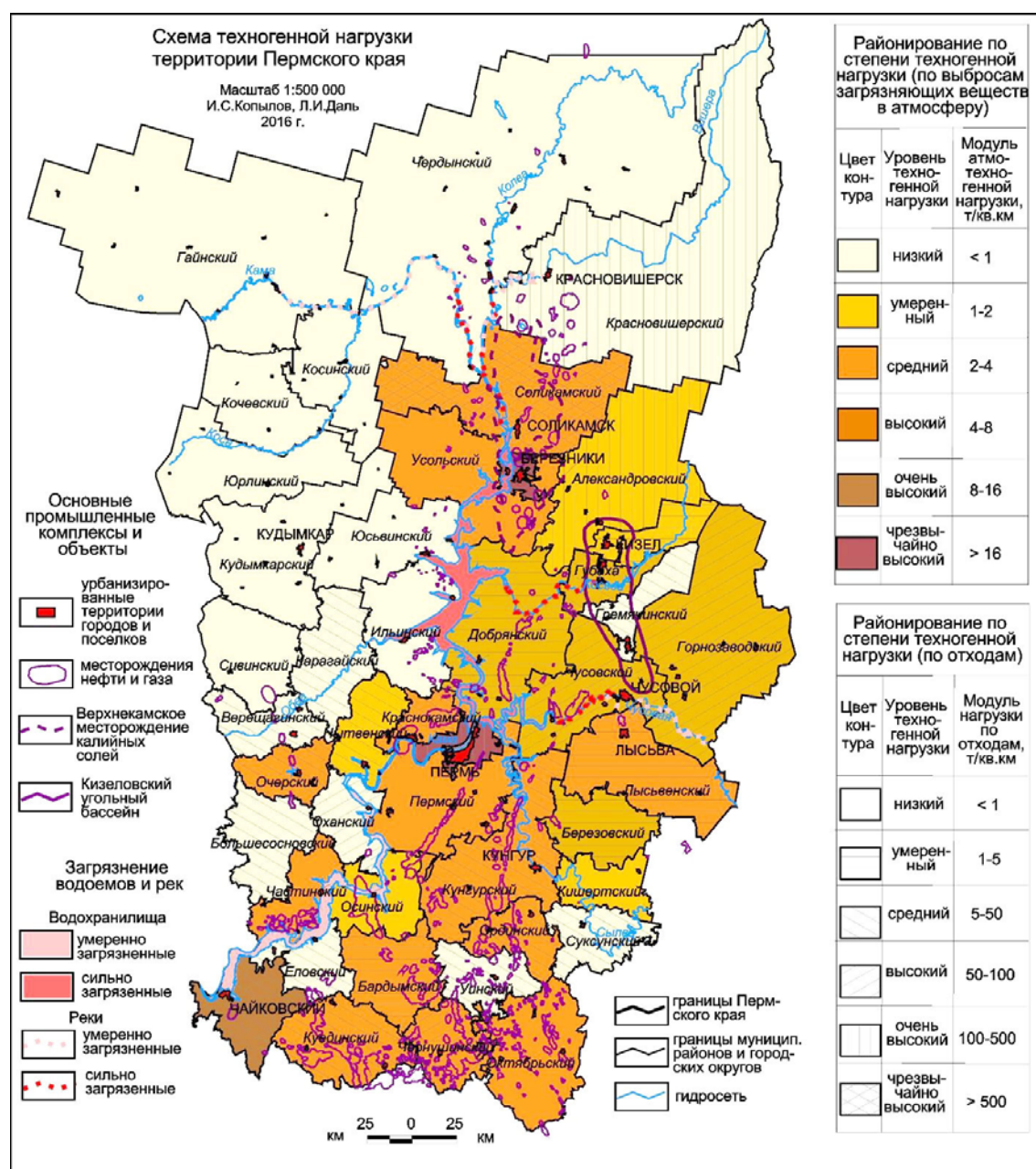


Рис. 1. Карта-схема зонирования территории Пермского края по уровню эколого-экономических рисков деградации земель от промышленных источников

потере продовольственного потенциала. Для земель промышленности акцент делается на технической рекультивации и внедрении НДТ, что согласуется с федеральной программой «Чистый воздух» [5].

Ограничением метода является необходимость детальных данных о пространственном распределении выбросов (факельный выброс, низкие источники) и трудоемкость актуализации почвенных карт. В расчетах использована упрощенная модель рассеивания, что может занижать риски в условиях сложного рельефа (восточная часть края – предгорья Урала). В перспективе планируется включить в модель динамический параметр – скорость самовосстановления почв на основе биоиндикации, а также учесть трансграничный перенос загрязнителей из соседних регионов (Свердловская область, Республика Башкортостан). Кроме того, целесообразно дополнить зонирование оценкой риска для здоровья населения, что повысит социальную значимость работы.

Сравнение результатов с данными мониторинга Росприроднадзора показывает высокую степень корреляции ($r=0.87$) для точек с установленными постами наблюдения, что подтверждает достоверность разработанной методики. В то же время для удаленных территорий с низкой плотностью наблюдений возможны погрешности, которые предлагается нивелировать путем спутниковой верификации.

Выводы и предложения

1. Разработана и апробирована трехфакторная методика зонирования территории по уровню эколого-экономических рисков деградации земель от промышленных источников, применимая для регионов с высокой техногенной нагрузкой. В отличие от существующих подходов, методика учитывает пространственную неоднородность уязвимости почв и экономическую дифференциацию земель, что позволяет ранжировать территории не только по экологическому, но и по экономическому приоритету.

2. В Пермском крае выделены зоны критического (6.2% территории), высокого (12.4%), среднего (28.9%) и низкого (52.5%) риска. Наиболее неблагоприятными являются агломерации городов Пермь,

Березники, Соликамск, Чайковский. Установлено, что в зоне критического риска находятся 11.2% сельскохозяйственных угодий края и 23.4% земель населенных пунктов, что требует безотлагательного пересмотра режима их использования и организации рекультивационных работ.

3. Экономический ущерб от деградации земель по всем зонам риска составляет 6.33 млрд руб. в год, из которых 2.7 млрд руб. приходится на зону критического риска. Внедрение оптимистического сценария снижения выбросов на 20% позволит сократить площадь критического риска до 3.8% и уменьшить ежегодный ущерб на 1.1 млрд руб.

4. Предложенная матрица приоритетности мероприятий (таблица 5) дает практические инструменты для органов местного самоуправления, землеустроительных организаций и предприятий-природопользователей.

Для реализации результатов зонирования предлагается:

- включить карты эколого-экономических рисков в состав схем землеустройства муниципальных районов и генеральных планов городских округов;
- применять дифференцированные ставки земельного налога для земель, попадающих в зоны критического и высокого риска (стимулирующая функция – повышение налога для предприятий-загрязнителей и понижение для тех, кто внедряет очистные сооружения);
- создать региональный геопортал «Экологический риск земель Пермского края» с ежеквартальным обновлением данных мониторинга и открытым доступом для всех заинтересованных сторон (население, бизнес, органы власти);
- разработать целевую программу рекультивации земель в зонах критического риска с финансированием из федерального, регионального бюджетов и частных источников (принцип ГЧП);
- обязать предприятия, внесенные в таблицу 3, ежегодно предоставлять отчеты о динамике загрязнения и ходе рекультивационных работ в открытом доступе.

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Пермского края в 2024 году» / Министерство природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края. Пермь. 2025. 312 с.
2. Арзамасцева Н.В., Ковалева Е.В., Мухаметзянов Р.Р. Критический анализ подходов вовлечения неиспользуемых земель в сельскохозяйственный оборот // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2022. №3. С. 77-89. DOI: <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-3-77-89>.
3. Hossain M.T., Al-Ahmadi K.M., Riad M.A. Remote sensing and GIS-based integrated approach for assessing agricultural land degradation and suitability in arid environments. Journal of Arid Environments. 2023. Vol. 210. Art. 104921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104921>.
4. Иванов В.П., Сидорова Е.А. Эколого-экономическая оценка деградации земель под влиянием промышленных объектов (на примере Удмуртской Республики) // Проблемы региональной экологии. 2023. №5. С. 44-51.
5. Об охране окружающей среды: Федеральный закон от 10.01.2002 №7-ФЗ (ред. от 04.08.2023) // Собрание законодательства РФ. 2002. №2. Ст. 133.
6. Методика исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды (утв. Приказом Минприроды России от 08.07.2010 № 238) // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. 2010. №34.

7. Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник / Н.Ф. Реймерс. М.: Мысль. 1990. 637 с.
8. Росляков П.В., Ширяев В.В. Моделирование рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере. Пермь: Изд-во ПГТУ. 2018. 186 с.
9. Доклад о состоянии земельных ресурсов Пермского края за 2024 год / Управление Росреестра по Пермскому краю. Пермь. 2025. 89 с.
10. Методические рекомендации по выявлению и обследованию земель, подвергшихся загрязнению нефтью и нефтепродуктами (утв. Минприроды России 15.02.2021) // СПС «КонсультантПлюс».

References

1. *Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Permskogo kraya v 2024 godu»* [State Report «On the State and Protection of the Environment of the Perm Krai in 2024»]. Ministry of Natural Resources, Forestry and Ecology of the Perm Krai. 2025. 312 p.
2. Arzamastseva N.V., Kovaleva E.V., Mukhametzhanov R.R. Critical analysis of approaches to involving unused lands in agricultural turnover. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2022. No. 3. Pp. 77-89. DOI: <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2022-3-77-89>.
3. Hossain M.T., Al-Ahmadi K.M., Riad M.A. Remote sensing and GIS-based integrated approach for assessing agricultural land degradation and suitability in arid environments. *Journal of Arid Environments*. 2023. Vol. 210. Art. 104921. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104921>.
4. Ivanov V.P., Sidorova E.A. Ecological and economic assessment of land degradation under the impact of industrial facilities (by the example of the Udmurt Republic). *Problemy regional'noy ekologii*. 2023. No. 5. Pp. 44-51.
5. On Environmental Protection: Federal Law No. 7-FZ of 10.01.2002 (as amended on 04.08.2023). *Sobraniye zakonodatel'stva RF*. 2002. No. 2. Art. 133.
6. Methodology for Calculating the Amount of Damage Caused to Soils as an Object of Environmental Protection (approved by Order of the Ministry of Natural Resources of Russia No. 238 of 08.07.2010). *Byulleten' normativnykh aktov federal'nykh organov ispolnitel'noy vlasti*. 2010. No. 34.
7. Reymers N.F. *Prirodopolzovanie: Slovar-spravochnik* [Nature Management: Dictionary-Reference Book]. Moscow: Mysl Publ. 1990. 637 p.
8. Roslyakov P.V., Shiryayev V.V. *Modelirovanie rasseivaniya zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfere* [Modeling of Pollutant Dispersion in the Atmosphere]. Perm: PSTU Publ. 2018. 186 p.
9. *Doklad o sostoyanii zemelnykh resursov Permskogo kraya za 2024 god* [Report on the State of Land Resources of the Perm Krai for 2024]. Rosreestr Office for the Perm Krai. Perm. 2025. 89 p.
10. *Metodicheskie rekomendatsii po vyyavleniyu i obsledovaniyu zemel, podvergshikhsya zagryazneniyu neftyu i nefteproduktami (utv. Minprirody Rossii 15.02.2021)* [Methodological Recommendations for Identifying and Surveying Lands Contaminated by Oil and Oil Products (approved by the Ministry of Natural Resources of Russia on 15.02.2021)]. SPS «KonsultantPlyus».

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Столяров Виктор Михайлович

кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой управления земельными ресурсами и кадастров, Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

Лепехин Павел Павлович

кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры почвоведения, мелиорации и геоэкологии, Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

Груздев Владимир Станиславович

доктор географических наук, доцент, заведующий кафедрой строительства, Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

Морковкин Геннадий Геннадьевич

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, профессор кафедры почвоведения, мелиорации и геоэкологии, Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

Кочетов Ян Сергеевич

аспирант кафедры управления земельными ресурсами и кадастров, Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

Information about authors Affiliations

Stolyarov Viktor Mikhailovich

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Land Management and Cadastres, State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Lepekhin Pavel Pavlovich

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Soil Science, Melioration and Geoecology, State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Gruzdev Vladimir Stanislavovich

Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Construction, State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Morkovkin Gennadiy Gennadyevich

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Professor of the Department of Soil Science, Melioration and Geoecology, State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Kochetov Yan Sergeyevich

Postgraduate Student of the Department of Land Resources Management and Cadastres, State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 29.07.2026 г.

ОПТИМИЗАЦИЯ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ НА ТРАНСГРАНИЧНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ: ВОПРОСЫ ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВА И КАДАСТРА (НА ПРИМЕРЕ РОССИЙСКО-КАЗАХСТАНСКОГО ПРИГРАНИЧЬЯ)

Лепехин П.П., Мурашева А.А., Черкашина Е.В., Груздев В.С., Столяров В.М.

Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

e-mail: shampolamo@gmail.com

В исследовании определены положения использования земель на сопредельных территориях приграничной зоны Российской Федерации и Республики Казахстан. Актуальность работы обусловлена значительными площадями неиспользуемых сельскохозяйственных земель и развитием негативных процессов деградации почв. Цель исследования – разработка предложений по оптимизации информационного обеспечения использования земель на трансграничных территориях на основе землеустроительных и кадастровых данных, материалов дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий. Материалами послужили данные ЕГРН, космические снимки Landsat и Sentinel, картографические материалы, архивные данные и результаты научных исследований. Методологическую основу составили системный, сравнительно-правовой, статистический и геоинформационный методы. Предложена схема сбора информации из открытых источников, система критериев эффективности информационного обеспечения и модель создания единой базы данных для сопредельных территорий. Проведен анализ трансграничных территорий Оренбургской и Омской областей с приграничными регионами Казахстана, выявлены различия землепользования и обоснована возможность кластеризации земель по экологическому состоянию. Научная новизна заключается в обосновании подхода к формированию актуальной базы данных о землях приграничных территорий на основе обработки Big Data с применением ГИС-технологий, кластеризации по степени экологического состояния и последующего планирования комплексных кадастровых и землеустроительных работ. Практическая значимость исследования заключается в том, что предложенные решения могут быть использованы органами местного самоуправления при принятии обоснованных управленческих решений, вовлечения неиспользуемых земель в хозяйственный оборот и обеспечения устойчивого землепользования.

Ключевые слова: землеустройство, кадастр, мониторинг земель, информационное обеспечение, приграничные территории, трансграничное сотрудничество, ЕГРН, дистанционное зондирование Земли, ГИС-технологии, деградация земель, устойчивое землепользование, комплексные кадастровые работы, цифровизация, Оренбургская область, Омская область, Казахстан.

OPTIMIZATION OF INFORMATION SUPPORT FOR LAND USE IN CROSS BOUNDARY TERRITORIES: ISSUES OF LAND MANAGEMENT AND CADASTRAL RECORDING (USING THE RUSSIAN KAZAKHSTAN BORDER REGION AS AN EXAMPLE)

Lepekhin P.P., Murasheva A.A., Cherkashina E.V., Gruzdev V.S., Stolyarov V.M.

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

The study defines the provisions for land use in the adjacent territories of the border zone of the Russian Federation and the Republic of Kazakhstan. The relevance of the work is due to the significant areas of unused agricultural land and the development of negative processes of soil degradation. The aim of the study is to develop proposals for optimizing the information support for land use in cross-border territories based on land management and cadastral data, materials from remote sensing of the Earth, and geoinformation technologies. The materials were USRN data, Landsat and Sentinel satellite images, cartographic materials, archival data, and scientific research results. The methodological basis is based on systematic, comparative-legal, statistical and geoinformation methods. A scheme for collecting information from open sources, a system of criteria for the effectiveness of information support, and a model for creating a unified database for adjacent territories are proposed. An analysis was conducted of the transboundary territories of the Orenburg and Omsk regions in relation to the border regions of Kazakhstan; differences in land use were identified, and the possibility of clustering lands based on their ecological condition was substantiated. The scientific novelty lies in the substantiation of an approach to forming an up-to-date database of lands in border areas based on Big Data processing using GIS technologies, clustering according to the degree of ecological condition, and the subsequent planning of comprehensive cadastral and land management works. The practical significance lies in the possibility of using the proposed solutions by local government bodies to make well-founded management decisions, to bring unused land into economic circulation, and to ensure sustainable land use.

Keywords: land management, cadastre, land monitoring, information support, border territories, cross-border cooperation, EGRN, remote sensing of the Earth, GIS technologies, land degradation, sustainable land use, integrated cadastral work, digitalization, Orenburg region, Omsk region, Kazakhstan.

Введение

С началом реформ на постсоветском пространстве одной из наиболее сложных проблем стало

развитие инструментов регулирования земельных отношений с учетом интересов всех субъектов и обеспечение комплексного развития приграничных

территорий при многочисленных экологических и правовых ограничениях. После распада Советского Союза и установления государственной границы между Российской Федерацией и Республикой Казахстан произошло постепенное увеличение площади неиспользуемых земель в приграничной зоне. Неиспользование земель привело к усилению воздействия негативных процессов, таких как ветровая эрозия (более 80% территории только Омской области подвержено ветровой эрозии), приводящая к опустыниванию [1]. Процессы засоления выражены в меньшей степени, но также достигают более 20% [2]. Тревогу вызывает усыхание лесов на северо-востоке Казахстана, незаконная вырубка уникальных сосновых лесов Иртышского региона, лесные пожары в Костанайской области. Все это способствует опустыниванию земель [3].

Осуществление контроля за состоянием и охраной земельных ресурсов входит в компетенцию различных органов управления. При этом оперативные решения на уровне местного и регионального самоуправления невозможны без полных, достоверных и актуальных пространственных данных, все это требует обновления планово-картографических материалов и данных кадастровых информационных систем [4,5].

На сегодняшний день в Российской Федерации имеются значительные площади земельных участков в приграничных районах, требующих решения проблемных вопросов, связанных с их экологическим состоянием и использованием [3]. По данным Счетной палаты Российской Федерации, на 1 января 2024 года общая площадь земель сельскохозяйственного назначения составляла 371.6 млн гектаров, из них 53.1% приходится на сельхозугодья. При этом почти 17% от их общей площади не использовалось. По данным Минсельхоза РФ, на начало 2025 года площадь неиспользуемых сельскохозяйственных земель составляет 31 млн га, из которых к 2030 году планируется ввести в оборот около 13 млн га [6].

Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года определяет приграничные регионы как геостратегические территории, а одним из направлений пространственного развития является повышение устойчивости пространственного развития приграничных территорий [7, 8].

Целью настоящего исследования является разработка предложений по оптимизации информационного обеспечения использования земель на трансграничных территориях на основе интеграции землеустроительных, кадастровых и мониторинговых данных, материалов дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Проведение анализа современного состоя-

ния информационного обеспечения использования земель на приграничных территориях Российской Федерации и Республики Казахстан.

2. Выявление основных проблем информационного обеспечения в рамках землеустройства, кадастра и мониторинга земель.

3. Разработка схемы сбора информации из открытых источников для целей оценки состояния земель.

4. Обоснование системы критериев эффективности информационного обеспечения.

5. Проведение анализа трансграничных территорий Оренбургской и Омской областей с приграничными регионами Казахстана и выявление предпосылок для кластеризации земель по экологическому состоянию.

6. Формирование предложений по созданию единой базы данных о землях приграничных территорий.

Теоретическую основу исследования составили работы ведущих российских ученых, исследователей в области землеустройства, кадастра и мониторинга земель. Вопросы трансграничного землепользования и мониторинга степных экосистем российско-казахстанского приграничья освещены в работах А.А. Чибилева, С.В. Левыкина, О.С. Рудневой и других исследователей [9-11]. Проблемы цифровизации землеустройства и геоинформационного обеспечения агропромышленного комплекса исследованы в работах Д.А. Шаповалова [12,13,14]. Вопросы информационного обеспечения вовлечения в оборот неиспользуемых земель и комплексных кадастровых работ рассматриваются в трудах А.А. Мурашевой, П.П. Лепехина [15,16,17,18]. В разработку проблем мониторинга земель и информационного обеспечения большой вклад внесли исследования П.П. Лепехина, в частности его работа «Развитие мониторинга земель недропользования» [4] и диссертационное исследование «Комплексный мониторинг земель объектов Сахалинского нефтегазового комплекса» [5].

Методика и материалы исследований

Материалами исследования послужили научные и практические работы по проблеме использования земель в приграничных территориях Российской Федерации [4-6,9-25]. В качестве исходных материалов использованы данные кадастров [16,26], картографический материал, космические снимки [13,19]. Методом исследования являлся анализ нормативной правовой документации, регулирующей вопросы закрепления земель [7,8], а также анализ научных публикаций и практических исследований на примере конкретных объектов Омской и Оренбургской областей и сопредельных территорий Республики Казахстан [15,17,19].

Одним из наиболее актуальных источников информации о развитии негативных процессов

являются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), космические снимки Landsat и их обработка с помощью современных программных продуктов (SagaGis, QGis, ArcGis, Mapinfo), а также архивные данные [12,13]. Применение технологий ДЗЗ обеспечивает регулярный оперативный мониторинг состояния земель и позволяет точно и объективно фиксировать нарушения, включая неиспользование пашни [4,14].

Методологическую основу исследования составили системный подход, позволивший рассмотреть информационное обеспечение управления земельными ресурсами как целостную многоуровневую систему [15,19]; сравнительно-правовой метод, использованный для анализа нормативной базы [7,8]; статистический метод, обеспечивший обработку количественных данных о состоянии земельного фонда [3]; картографический и геоинформационный анализ – для интерпретации пространственных данных [12,13]; метод экспертных оценок, использованный при формировании системы критериев эффективности [17,20]; метод сравнительного анализа трансграничных территорий, использованный для выявления различий в землепользовании [9-11,21-25].

Основные результаты

При планировании использования земельных ресурсов необходимо анализировать имеющуюся и перспективную ситуацию развития различных процессов, что вызывает необходимость постоянного обновления планово-картографического материала [4,16]. Отсутствие достоверных данных вызывает сложности в объективной оценке состояния и использования земель, а также в принятии обоснованных управленческих решений [15,19].

Основной целью является формирование устойчивого землепользования, учитывающего социальные, экологические и экономические факторы [13,18]. Особую тревогу вызывает развитие процес-

сов деградации земель и снижения почвенного плодородия [1,2]. Основными негативными процессами для различных регионов приграничных территорий являются эрозионно-опасные земли, подтопление, переувлажнение, каменистость, заболачивание, засоление, нарушенные земли, радиационное загрязнение [1,3].

Авторами проведен анализ степени разработанности проблемы информационного обеспечения оценки состояния и использования земельных участков в сельскохозяйственном производстве на примере приграничных регионов Российской Федерации [15,17,20]. Показано, что наибольший процент распаханности и наименьшая площадь сенокосов и пастбищ наблюдается в отдельных муниципальных районах, что позволяет сделать вывод о несбалансированности территориальной организации [3]. Агроландшафты степной зоны сильно изменены хозяйственной деятельностью, что привело к экологическим проблемам [1,2].

Усиление негативных процессов в приграничной зоне связано и с неиспользованием земель [6]. Поскольку земля является невозполнимым и ограниченным ресурсом, основными показателями организации рационального использования и охраны земель должны стать: защита земель от деградации и выбытия из хозяйственного оборота, а также формирование экономических условий, стимулирующих сохранение земель [6,15].

Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года определяет приграничные регионы как геостратегические территории, а одним из направлений пространственного развития является повышение устойчивости пространственного развития приграничных территорий.

Авторами предложена схема (рис. 1) сбора информации, который осуществляется из различных открытых источников.



Рис. 1. Схема информационного обеспечения оценки состояния земель и природных ресурсов приграничных территорий

На рисунке 2 представлена типичная схема образования земельного участка как экономического объекта [16,18].

На рисунке 3 приведены подробные критерии эффективности информационного обеспечения вовлечения в хозяйственный оборот неиспользуемых земель [15,17].

Каждый из представленных критериев эффективности информационного обеспечения обладает специфическим набором индикаторов и складывается из суммы всех показателей [15,17]:

1. *Социальная сфера*: А. Показатели снижения безработицы. В. Показатели общественной реакции. С. Показатели социального развития. D. Показатели предпринимательской активности.

2. *Экономические показатели*: А. Темпы роста сельскохозяйственных организаций. А. Улучшение качественного состояния почвы. В. Актуальность

кадастровой стоимости. С. Организационные улучшения. D. Приток инвестиций.

3. *Экологические показатели*: А. Общее состояние экологии региона. В. Показатель восстановления земель. С. Показатель загрязнения территории.

4. *Административные показатели*: А. Государственное управление. В. Государственный учет земель. С. Разработка новых законов.

5. *Институциональные показатели*: А. Защита и безопасность. В. Контроль.

6. *Оценка комплексности подхода*.

7. *Оценка по времени*.

8. *Оценка стоимости услуг*.

По нашему мнению, предлагаемая система индикаторов информационного обеспечения оптимизации использования и состояния земель на трансграничных территориях приграничной зоны может быть использована для формирования базы данных

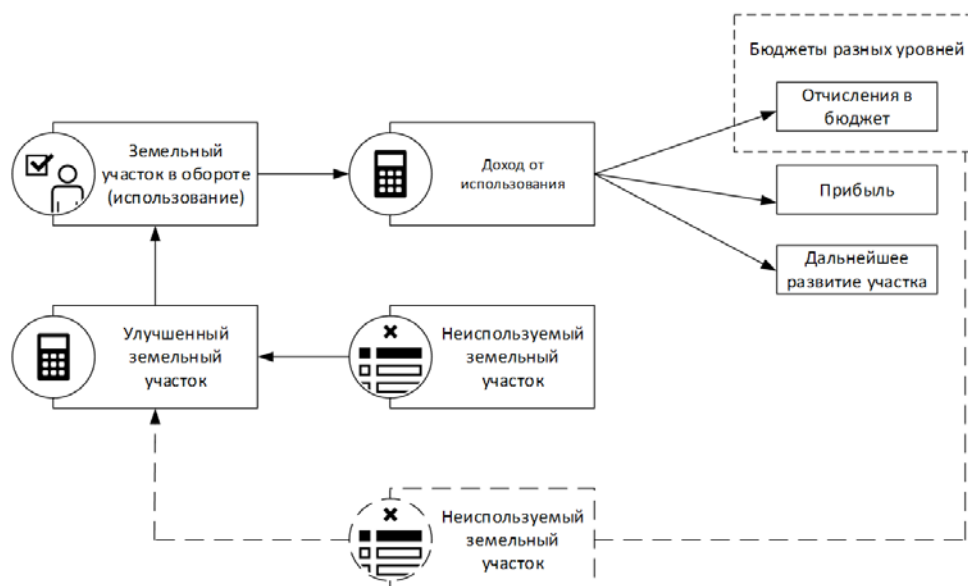


Рис. 2. Схема образования и вовлечения земельных участков в хозяйственный оборот



Рис. 3. Критерии эффективности информационного обеспечения состояния и использования сельскохозяйственных земель

об этих землях [15,16]. Фактически, стороны земельных отношений смогут оценивать наилучшее распределение ресурсов и прогнозировать результаты развития территорий, что, в свою очередь, будет являться неоспоримым преимуществом при разработке и принятии сбалансированных управленческих решений [17,20].

Анализ трансграничной территории Оренбургской области и Казахстана

Особого внимания заслуживает анализ трансграничной территории, формируемой на стыке Оренбургской области Российской Федерации и приграничных областей Республики Казахстан – Западно-Казахстанской, Актыубинской и Костанайской. Данный регион представляет собой уникальный объект для исследования процессов землепользования, поскольку граница здесь имеет широтное протяжение, находится ближе к 51 градусу северной широты, и проходит в основном в северной части сухостепной подзоны Заволжья, Южного Урала и Зауралья, располагаясь в основном в поясах темно-каштановых почв и южных черноземов [12]. При этом для Оренбургской области граница с Казахстаном является южной и юго-восточной окраиной с земельными угодьями, земли которых относятся к землям с низким бонитетом. Эта приграничная территория характеризуется засушливым климатом – зоной особого риска богарного земледелия. Со стороны Казахстана, напротив, это северная окраина, где сконцентрированы лучшие для Западного Казахстана земельные угодья, однако также характеризующиеся засушливым климатом и особым риском ведения богарного земледелия [12].

Протяженность государственной границы Оренбургской области с Республикой Казахстан составляет 1876 км [19]. Основная часть территории области – земли сельскохозяйственного назначения – 10 930.3 тыс. га, или 88% всей площади, в том числе сельскохозяйственные угодья – 10 470.6 тыс. га, из них пашня – 6033.2 тыс. га, сенокосы – 665.6 тыс. га, пастбища – 3761.4 тыс. га [19]. Климат данной территории характеризуется ярко выраженной континентальностью: жаркое, засушливое лето со средними температурами июля около +21°C, холодная малоснежная зима (средняя температура января -18°C) и незначительное количество осадков (250-290 мм в год), большая часть которых приходится на летний период [14]. За последнее столетие в южных районах области сильные и средние засухи наблюдались один раз в два-три года [19].

Для истории Оренбургско-Казахстанского степного региона в целом характерна скачкообразная динамика посевных площадей, обусловленная колебаниями увлажнения и социально-экономическими факторами [9]. В силу наличия лучших для Западного Казахстана земельных угодий степные залежи 1990-х годов начали в первую очередь рас-

пахиваться со второй половины 2000-х годов, причем огромными массивами. Так, в 2008-2012 гг. были практически полностью распаханы вторичные лессингокомовые степи на Общем Сырте в Западно-Казахстанской области, которые больше всего тяготеют к Первомайскому району Оренбургской области, а также практически все залежные земли в Айтекебийском районе Западно-Казахстанской области – примерно 200 тыс. га. Последние вторичные степи Айтекебийского района, прилежащие к Светлинскому району Оренбургской области, были допаханы в 2013 г. [9].

В Оренбургской области, наоборот, из-за нескольких засушливых лет наблюдается устойчивая тенденция к сокращению посевных площадей в Первомайском, Соль-Илецком, Акбулакском, Домбаровском, Ясенском, Светлинском районах. Со стороны Светлинского района вдоль границы с Айтекебийским районом сформировался пояс залежей, протяженность которых составляет несколько десятков километров, в то время как на сопредельной территории Айтекебийского района угодья полностью распаханы, и частично используются под выпас мясного скота [9]. Такая асимметрия в землепользовании по обе стороны границы требует формирования трансграничного информационного взаимодействия в сфере мониторинга земель.

Основным природным вызовом последнего времени для сельского хозяйства по обе стороны границы стали участвовавшие засухи с аномально жарким весенним и раннелетним периодом. Следствием чего является кризис земледелия, усыхание озер, вспышки саранчовых. В то же время возрождающиеся благодаря усилиям Республики Казахстан популяции сайгака в летний период вплотную подходят к границам с Оренбургской областью и, по опросным данным, пересекают ее с заходом в Первомайский и Светлинский районы [9].

В пределах Российско-Казахстанского трансграничного региона отмечается активное восстановление степных экосистем на неиспользуемых сельскохозяйственных землях, наблюдается положительная динамика титульных видов степной флоры и фауны, среди которых ковыль Лессинга, сурок, дрофа, стрепет, сайгак [9]. Ежегодные мониторинговые исследования степных территорий в пределах России и Казахстана, проводимые с 2009 года, позволили выявить около 200 массивов эталонных и вторичных степных экосистем, которые могут быть объединены в 6-7 модельных территорий согласно географическому принципу [9]. Экспедиционными исследованиями были охвачены территории Западно-Казахстанской, Актыубинской, Костанайской и Акмолинской областей Республики Казахстан, а также приграничные территории Оренбургской области [9].

Для выявления и мониторинга целинных и

вторичных степей, залежных массивов и очагов распахки применяются данные общедоступных спутниковых снимков, изучаются характеристики исследуемых объектов (общегеографические показатели, степень антропогенной нарушенности), устанавливаются связи между негативными и позитивными процессами, влияющими на степные экосистемы [9]. Ведется создание геоинформационной базы выявленных объектов и их картирование [9].

Примером успешного трансграничного сотрудничества в сфере мониторинга земель является взаимодействие в рамках соглашения о сотрудничестве по борьбе с саранчовыми вредителями между филиалом ФГБУ «Россельхозцентр» по Оренбургской области и профильными ведомствами Республики Казахстан. В 2026 году был проведен мониторинг приграничных зон, охвативший территории Акбулакского и Соль-Илецкого районов Оренбургской области, а также Кобдинского района Актюбинской области Республики Казахстан. В ходе обследования 2,5 тыс. га земель стадных видов саранчовых не обнаружено, по результатам работы обе стороны подписали акты обследования [21].

Исследования показывают, что в пределах Оренбургско-Казахстанского экорегиона выделяются два трансграничных кластера, наиболее важных с позиций сохранения и восстановления ландшафтно-биологического разнообразия степей [10]. Особая динамика и специфика разрушения степных ландшафтов и их последующей самореабилитации изучены в начале XXI века в пределах степного Предуралья: Оренбургской области Российской Федерации и Западно-Казахстанской области Республики Казахстан [10]. Именно здесь реализовывались проекты сохранения и восстановления степей, результаты которых имеют глобальное значение: в России – проект ПРООН/МПР/ГЭФ «Совершенствование системы и механизмов управления ООПТ в степном биоме России» (2010–2016), одним из четырех пилотных регионов которого стала Оренбургская область; в Казахстане – проект ПРООН/Правительства РК/ГЭФ «Сохранение и устойчивое управление степными экосистемами» (2011–2016), позитивные результаты которого легли в основу восстановления ресурсов сайгака, прежде всего волго-уральской популяции [10].

Резолюцией Генеральной Ассамблеи ООН №73/284 от 1 марта 2019 г. период с 2021 по 2030 гг. объявлен Десятилетием ООН по восстановлению экосистем, прежде всего на деградированных землях, включая сельскохозяйственные [10]. Россией поддержана эта инициатива, Общественной палате РФ поручено курировать это направление с учреждением Национального комитета [10].

Таким образом, проведенный анализ показывает, что трансграничная территория Оренбургской области и Казахстана характеризуется выраженной

асимметрией в землепользовании: при относительном сокращении посевных площадей и формировании пояса залежей на российской стороне наблюдается практически полная распахка сопредельных территорий казахстанской стороны. Это создает объективные предпосылки для организации совместного мониторинга земель на основе единой методологии, проведения согласованной политики по вовлечению в оборот неиспользуемых земель, создания единой базы данных о землях трансграничной территории и развития системы трансграничных особо охраняемых природных территорий.

Анализ трансграничной территории Омской области и Казахстана в сравнении с Оренбургской областью

Для полноты картины и выявления специфических черт трансграничного землепользования необходимо рассмотреть еще один ключевой участок российско-казахстанской границы – Омскую область. Ее анализ в сравнении с Оренбургской областью позволяет выявить как общие закономерности, так и уникальные региональные особенности, критически важные для разработки универсальной системы информационного обеспечения.

Омская область граничит с двумя областями и пятью районами Республики Казахстан, общая протяженность границы составляет 1008 км [22]. В отличие от Оренбургской области, где граница имеет широтное протяжение и тяготеет к 51 градусу северной широты, омский участок границы имеет преимущественно меридиональное направление и охватывает более северные природно-климатические зоны – от степи до южной тайги. Это определяет существенные различия в структуре земельного фонда и характере деградационных процессов.

Омская область, как и Оренбургская, является регионом интенсивного сельскохозяйственного освоения. Однако если для Оренбургской области характерна выраженная асимметрия в землепользовании (сокращение посевных площадей на российской стороне при практически полной распахке сопредельных казахстанских территорий), то для Омской области ситуация имеет свои особенности. Исследования показывают, что по уровню сельскохозяйственной освоенности территории Омская область находится на уровне 6 баллов, соответствуя Павлодарской (5 баллов) и Восточно-Казахстанской (7 баллов) областям Казахстана [23]. При этом Северо-Казахстанская область, граничащая с Омской, является лидером по распаханности сельхозугодий (10 баллов) [23]. Это создает предпосылки для формирования на омском участке границы иного типа трансграничных ландшафтов, чем на оренбургском.

Деградационные процессы на землях сельскохозяйственного назначения Омской области носят тотальный характер: по данным Россельхознадзора, они наблюдаются во всех районах области [24].

С 2016 года идет активное подтопление территории северных районов поступающей водой со стороны Тюменской области, приведшее к переувлажнению почвы и подъему грунтовых вод, впоследствии пониженные участки заболотились [24]. Ежегодное весеннее подтопление происходит практически во всех районах области [24]. Из всех земель области в слабой степени затронуто процессами эрозии 1328.9 тыс. га (75.4%) с уменьшением валовых запасов гумуса на 12.4%; в средней степени разрушено 405.0 тыс. га (23%) с потерями 35% валовых запасов гумуса; имеется 28.6 тыс. га (1.6%) сильно и очень сильно эродированных и дефлированных земель с утратой валовых запасов гумуса свыше 50% [24]. В целом по области почвы сельскохозяйственных угодий эродированы и дефлированы в среднем на 26.3%, в том числе почвы степи – на 49.8% [24].

Для сравнения, в Оренбургской области основными негативными процессами являются эрозийно-опасные земли, подтопление, переувлажнение, каменистость, заболачивание, засоление [8]. В Оренбургской области 2214.9 га подвержено водной эрозии, 279.4 га — ветровой, а из общей площади 6240.0 тыс. га дефляционно-опасная эрозия составляет 5304.3 тыс. га [8]. Оврагами занято 22759 га, причем каждый гектар оврагов выводит из использования в среднем за 20 лет 3.5 га плодородной земли [8].

Таким образом, если для Оренбургской области более характерна ветровая эрозия и дефляция, связанные с засушливым климатом, то для Омской области – сочетание водной эрозии, подтопления и переувлажнения, что обусловлено ее положением в более гумидной зоне.

Омская область демонстрирует активное развитие трансграничного сотрудничества в сфере мониторинга земель. Филиалом ФГБУ «Россельхоз-

центр» по Омской области подписаны соглашения с Северо-Казахстанским и Павлодарским областными филиалами РГУ «Республиканский методический центр фитосанитарной диагностики и прогнозов» КГИ в АПК МСХ РК с целью взаимного сотрудничества в обеспечении фитосанитарной безопасности территорий [22]. В соответствии с Планом совместных мониторинговых мероприятий по саранчовым вредителям и луговому мотыльку, проводятся совместные обследования приграничной территории [22]. В 2025 году в обследовании приняли участие два специалиста со стороны Шербакульского районного отдела филиала Россельхозцентра по Омской области и пять из Республики Казахстан, подготовлен и подписан акт о совместном обследовании приграничной территории [22].

Примером научно-образовательного сотрудничества является взаимодействие Омского ГАУ и Казахского агротехнического университета им. С.С. Сейфуллина. В 2025 году был проведен круглый стол на тему «Оценка земель сельскохозяйственного назначения», в ходе которого были рассмотрены актуальные вопросы оценки земель, применения современных информационных технологий и геоинформационных систем в сфере кадастра и управления земельными ресурсами [25]. Омский ГАУ и Казахский агротехнический исследовательский университет реализуют совместную образовательную программу «Цифровое управление земельными ресурсами» [25]. Проведенное сопоставление позволяет выделить несколько ключевых различий, представленных в таблице 1.

Как видно из таблицы, обе территории сталкиваются с серьезными проблемами деградации земель, однако их природа различна. В Омской области преобладают процессы, связанные с избыточным увлажнением и водной эрозией, в то время как в

Таблица 1

Сравнительная характеристика трансграничных территорий Омской и Оренбургской областей

Параметр	Омская область	Оренбургская область
Протяженность границ регионов с Казахстаном	1008 км [23]	1876 км [9]
Сопредельные регионы Казахстана	Северо-Казахстанская, Павлодарская области	Западно-Казахстанская, Актюбинская, Костанайская области
Природно-климатические зоны	Степь, лесостепь, южная тайга	Сухостепная подзона, темно-каштановые почвы, южные черноземы
Преобладающие деградационные процессы	Водная эрозия, подтопление, переувлажнение, заболачивание [24]	Ветровая эрозия, дефляция, засоление, опустынивание [8]
Степень эродированности почв	В среднем 26.3% (в степи – 49.8%) [24]	Дефляционно-опасная эрозия – 5304.3 тыс. га [8]
Тип асимметрии землепользования	Умеренная распаханность при высокой освоенности сопредельной Северо-Казахстанской области [23]	Выраженная асимметрия: пояс залежей на российской стороне при полной распашке казахстанских территорий [9]
Основные направления трансграничного сотрудничества	Фитосанитарный мониторинг, научно-образовательное сотрудничество, совместные обследования [22,25]	Мониторинг степных экосистем, сохранение биоразнообразия, борьба с саранчовыми [9,21]
Ключевые проекты	Совместная программа «Цифровое управление земельными ресурсами» [25]	Проекты ПРООН/ГЭФ по сохранению степных экосистем [10]

Оренбургской области доминируют ветровая эрозия и опустынивание. Это требует дифференцированного подхода к формированию системы информационного обеспечения: для Омской области критически важны данные о подтоплении и заболачивании, для Оренбургской – о ветровой эрозии и дефляции.

Общим для обеих территорий является наличие развитого трансграничного сотрудничества в сфере мониторинга земель, что создает благоприятную основу для формирования единой информационной базы. Опыт Омской области в организации совместных фитосанитарных обследований и научно-образовательных программ может быть распространен на более широкий круг задач, включая комплексный мониторинг земель и обмен кадастровой информацией.

Проведенное сопоставление трансграничных территорий Омской и Оренбургской областей позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, несмотря на общие тенденции (сокращение сельскохозяйственного использования земель, развитие деградационных процессов, наличие трансграничного сотрудничества), каждая территория имеет выраженную специфику, обусловленную природно-климатическими и историческими факторами. Во-вторых, для формирования эффективной системы информационного обеспечения необходимо учитывать эту специфику при выборе индикаторов мониторинга и методов обработки пространственных данных. В-третьих, существующий опыт трансграничного сотрудничества в обеих областях может быть интегрирован в единую систему информационного обеспечения земель российско-казахстанского приграничья.

Исходя из проведенного исследования, были выявлены основные проблемы информационного обеспечения использования земель на трансграничных территориях. По нашему мнению, на сегодняшний день в Российской Федерации информационное обеспечение как уже использующихся земель, так и тех, которые предполагается ввести в хозяйственный оборот, сильно недооценено [6, 18]. Основанием для подобного вывода служит то, что государственный мониторинг как основное мероприятие, в результате которого власть и заинтересованные лица могут располагать актуальной информацией о качественном и количественном состоянии земельных ресурсов, проводится нерегулярно [4,5,14]. Основными проблемами информационного обеспечения, рассмотренными в исследовании, являются

[6,15,17,19]:

1. Колоссальные площади неучтенной земли, а следовательно, потеря денежных средств государством.
2. Нерациональное использование земли. Многие сельскохозяйственные земли простаивают, и их состояние ухудшается.
3. Невозможность создания новых рабочих мест на селе и формирования достойных социальных условий.
4. Невозможность оказания помощи в части качественной оценки состояния почв для сельскохозяйственных организаций.
5. Возникновение споров относительно определения справедливой кадастровой стоимости участков и невозможность ее оспаривания по качественным показателям.
6. Возникновение кадастровых ошибок.
7. Несвоевременность контроля экологической ситуации.

В представленном исследовании земельно-кадастровая информация играет определяющую роль в регулировании земельных отношений [16,26]. С ее помощью устанавливаются физические характеристики объектов, подтверждаются и защищаются права собственности или иные вещные права. Потребность в этой информации, как показано в работах А.А. Мурашевой [16,17], постоянно возрастает в условиях цифровизации землеустройства и кадастра.

Важность развития информационного обеспечения земельных отношений в целом, как отмечается в исследованиях Д.А. Шаповалова, обусловлена необходимостью цифровой трансформации землеустройства и создания единой геоинформационной среды для принятия управленческих решений [12,13,14].

Таким образом, авторами в результате проведенных исследований предложено для оптимизации использования и оценки состояния земельных участков на сопредельной территории проведение актуализации кадастровых данных земельных участков на этих территориях [16,17,26].

Научная новизна проведенных исследований заключается в том, что для упорядочения землепользования на сопредельных территориях приграничной зоны предложено создание актуальной базы данных для этой территории с учетом ее особенностей, экологического состояния; информация рекомендуется для передачи органам местного

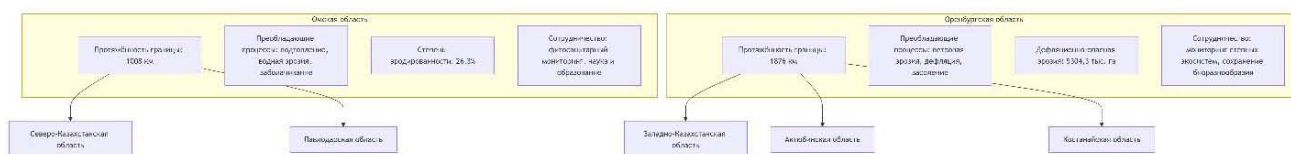


Рис. 4. Сравнительная схема трансграничных территорий Омской и Оренбургской областей с выделением преобладающих деградационных процессов и направлений сотрудничества

самоуправления [15,17]. Создание базы данных основывается на применении космических снимков Landsat, обработки большого количества данных Big Data с применением современных программных продуктов, применяемых для обработки, выявления репрезентативных показателей, которые в дальнейшем используются для проведения оценки состояния земель, кластеризации по степени их экологического состояния [12,13,20]. В дальнейшем работы проводятся в кластерах для планирования проведения комплексных кадастровых и землеустроительных работ и разработки и реализации рекомендаций возможного использования земельных участков, результат которого позволит добиться устойчивого экологического равновесия и устойчивого землепользования [6,15,20].

Проведенные исследования позволяют обеспечить восстановление состояния земель, рационально и эффективно их использовать и получать дополнительные доходы в бюджеты, которые в последующем также будут использованы для проведения мелиоративных и землеустроительных работ [6,18].

Обсуждение

Проведенное исследование позволяет сформулировать ряд дискуссионных положений.

Первое. Эффективность информационного обеспечения землепользования определяется не только наличием данных, но и их интеграцией в единую систему, объединяющую кадастровую, землеустроительную и мониторинговую информацию [15,17,19]. Опыт зарубежных стран показывает, что создание единых цифровых реестров недвижимости и пространственных данных является системообразующим элементом управления земельными ресурсами. Этот вывод согласуется с исследованиями Д.А. Шаповалова о необходимости цифровой трансформации землеустройства [12,13].

Второе. Анализ трансграничной территории Оренбургской области и Казахстана выявил выраженную асимметрию землепользования: при формировании пояса залежей на российской стороне наблюдается практически полная распахка сопредельных территорий казахстанской стороны [9]. Это ставит дискуссионный вопрос о необходимости согласованной трансграничной политики в сфере землепользования и мониторинга земель. Опыт совместных обследований по борьбе с саранчовыми вредителями демонстрирует практическую возможность такой координации [21].

Третье. Сравнительный анализ Омской и Оренбургской областей показал, что при общности проблем деградации земель природа этих процессов существенно различается: для Омской области характерны водная эрозия и подтопление, для Оренбургской – ветровая эрозия и дефляция [8,24]. Это означает, что универсальная система информацион-

ного обеспечения должна быть адаптивной и учитывать региональную специфику при выборе индикаторов мониторинга.

Четвертое. Дискуссионным остается вопрос о степени централизации информационного обеспечения. С одной стороны, создание единой базы данных для трансграничных территорий требует координации на межгосударственном уровне [8]. С другой стороны, оперативные решения должны приниматься на муниципальном уровне, что предполагает децентрализацию [3,10]. Опыт реализации проекта по созданию Единого геоинформационного портала Союзного государства по земельным ресурсам показывает, что такая координация возможна [3].

Пятое. Применение технологий дистанционного зондирования Земли и БПЛА для мониторинга земель становится все более востребованным [12,13]. Как отмечается в аналитических материалах Росреестра, переход на дистанционный мониторинг как основной инструмент первичного контроля позволяет оперативно сопоставлять полученные снимки с информацией из ЕГРН и выявлять нарушения [26]. Однако для полноценного внедрения таких технологий необходима не только техническая, но и нормативно-правовая база [7].

Шестое. Проблема вовлечения неиспользуемых земель в оборот требует комплексного подхода, включающего не только информационное обеспечение, но и экономические механизмы стимулирования [6]. Исследования А.А. Мурашевой показывают, что интегральная оценка геоэкологического состояния земель является эффективным методом для определения приоритетов вовлечения их в оборот [15,17].

Седьмое. Проведенный анализ имеет ограничения: рассмотрены приграничные территории Российской Федерации и Республики Казахстан, при этом основное внимание уделено информационному аспекту, тогда как экономические и правовые механизмы остались за рамками [6,20]. Эти ограничения определяют направления дальнейших исследований.

Заключение

Рассмотренная проблематика информационного обеспечения состояния и использования земель в приграничных зонах в современных условиях является актуальной и требует решения на основе применения современных методов, способов и технологий, которые позволяют сделать решение проблемы более эффективным за счет создания информационной базы для этих территорий [15,17,19]. Показано, что основной проблемой оптимизации землепользования, обеспечения устойчивого экологического состояния таких земель является отсутствие информации о них в ЕГРН РФ и ИС ГЗК РК из-за отсутствия документов, необходимых для решения вопросов по их дальнейшему рациональному использованию

в условиях пространственного развития территорий пограничных регионов Российской Федерации и Республики Казахстан [3,16,26].

Проведенные исследования на конкретных объектах доказывают, что проблемы необходимо решать комплексно на основе выполнения кадастровых, оценочных и землеустроительных работ с применением современных информационных технологий, программных продуктов для обработки BigData, геоинформационных систем, методов дистанционного зондирования [4,5,12,13,20].

Практические рекомендации:

1. Создание единой базы данных о землях сопредельных территорий с включением качественных и количественных характеристик, данных ЕГРН и материалов ДЗЗ [15-17].

2. Актуализация кадастровых данных земельных участков на приграничных территориях с проведением комплексных кадастровых работ [16,20,26].

3. Внедрение кластерного подхода к оценке эко-

логического состояния земель для приоритизации мероприятий по восстановлению и вовлечению в оборот [15,17,19].

4. Интеграция данных государственного мониторинга земель в ЕГРН для обеспечения регулярного обновления информации [4,5,14].

5. Развитие межгосударственного информационного взаимодействия в сфере землеустройства, кадастра и мониторинга земель, в том числе на основе опыта совместных российско-казахстанских обследований [3,8,21,22].

6. Формирование трансграничных кластеров мониторинга земель на основе геоэкологического районирования и выявленных зон асимметрии землепользования [9-13,21-25].

7. Дифференциация индикаторов мониторинга земель с учетом региональной специфики деградационных процессов (водная эрозия и подтопление – для Омской области; ветровая эрозия и дефляция – для Оренбургской области) [8,24].

Список литературы

1. Рейнгард Я.Р. Деградация почв экосистем юга Западной Сибири: монография. Лодзь: Польша. 2009. 636 с.
2. Иванов В.Д., Кузнецова Е.В. Эрозия и охрана почв Центрального Черноземья России: учебное пособие. Воронеж: ВГАУ. 2003. 360 с.
3. Сводный аналитический отчет о состоянии и использовании земель Республики Казахстан за 2021 год / Министерство сельского хозяйства Республики Казахстан, Комитет по управлению земельными ресурсами. Нур-Султан. 2021. 334 с.
4. Лепехин П.П., Тетерюков Е.В. Развитие мониторинга земель недропользования // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2017. Т. 146. №3. С. 49-53.
5. Лепехин П.П. Комплексный мониторинг земель объектов Сахалинского нефтегазового комплекса: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.26. М.: Государственный университет по землеустройству. 2018. 188 с.
6. Хлыстун В.Н., Мурашева А.А., Столяров В.М. Концептуальные подходы к разработке и реализации программы вовлечения в оборот неиспользуемых сельскохозяйственных земель // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2022. №5. С. 285-293.
7. Концепция Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 13.02.2019 №207-р. URL: <http://static.government.ru/media/files/UVAIqUfT08o60RktoOX122JjAe7irNxc.pdf>.
8. Прогнозная схема территориально-пространственного развития страны до 2030 года: постановление Правительства Республики Казахстан от 09.10.2019 №185. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U1900000185>.
9. Чибилёв А.А., Левыкин С.В., Казачков Г.В. и др. Российско-Казахстанская трансграничная территория: опыт мониторинга степных экосистем // Известия Русского географического общества. 2023. Т. 155. №9. С. 3-18.
10. Левыкин С.В., Казачков Г.В., Яковлев И.Г., Грудинин Д.А. Предложения по сохранению ландшафтного и биологического разнообразия степей в трансграничной зоне Оренбургской области РФ и Актыбинской области РК // Степной бюллетень. 2020. №54. С. 4-12.
11. Руднева О.С. Особенности землепользования на российско-казахстанских степных приграничных территориях (на примере восточных районов Оренбургской области и Айтекебийского района Актыбинской области) // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. №2(88). С. 145-150.
12. Волков С.Н., Шаповалов Д.А. Цифровое землеустройство – проблемы и перспективы // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 3. №2. С. 26-35.
13. Шаповалов Д.А., Черкашина Е.В., Комарова С.И. Avenues for the Economic Assessment of Agricultural Lands in the Development of the Agricultural Industry // BIO Web of Conferences. 2021. Vol. 37. Art. 00088.
14. Рухович Д.И., Шаповалов Д.А. Об особенностях мониторинга почвенно-земельного покрова как информационной основы эффективного землепользования // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. 2015. №9. С. 45-52.
15. Мурашева А.А., Столяров В.М., Мельникова А.А. Интегральная оценка геоэкологического состояния как метод по вовлечению в оборот неиспользуемых земель // Московский экономический журнал. 2019. №5.
16. Мурашева А.А., Лепехин П.П., Столяров В.М., Вдовенко А.В., Мельникова А.А. Формирование информационно-картографического материала для обеспечения комплексных кадастровых работ с использованием современных технологий // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 867. Art. 012075.
17. Мурашева А.А., Столяров В.М., Лепехин П.П., Рахимбердина М., Толеубекова Л. Optimization of information support for land use in transboundary territories // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 510. Art. 04005.
18. Мурашева А.А., Лепехин П.П., Столяров В.М., Мельникова А.А. Концептуальные подходы введения в оборот неиспользуемых земель обороны и безопасности // Journal of Agriculture and Environment. 2023. №10(38).
19. Мельникова А.А., Мурашева А.А., Столяров В.М., Камов Л.П. Мониторинг земель: проблемы и совершенствование информационного обеспечения // Международный сельскохозяйственный журнал. 2019. №6(372). С. 46-49.
20. Отвагина М.Г., Шаповалов Д.А., Мурашева А.А. Сравнение комплексных кадастровых работ и инвентаризации земель // Московский экономический журнал. 2022. №7.

21. Материалы филиала ФГБУ «Россельхозцентр» по Оренбургской области о совместных трансграничных обследованиях на выявление особо опасных вредителей. 2026.
22. Материалы филиала ФГБУ «Россельхозцентр» по Омской области о совместных мониторинговых мероприятиях по саранчовым вредителям и луговому мотыльку на приграничных территориях. 2025.
23. Бардаханова Т.Б., Михеева А.С., Лопаткин Д.А. и др. Комплексная оценка антропогенной нагрузки на агроландшафты трансграничных территорий Северной Азии // Международный сельскохозяйственный журнал. 2023. Т. 66. №3(393). С. 250-255.
24. О состоянии и использовании земель сельскохозяйственного назначения Омской области: аналитические материалы Управления Россельхознадзора по Омской области. Омск. 2024.
25. Материалы Омского государственного аграрного университета о совместной образовательной программе «Цифровое управление земельными ресурсами» с Казахским агротехническим исследовательским университетом им. С.С. Сейфуллина. 2025.
26. Турегалиева Ж.Т. Совершенствование методики учёта земельных участков на основе современных технологий // Молодой ученый. 2026. №10(613). С. 56-62.

References

1. Reyngard Ya.R. *Degradatsiya pochv ekosistem yuga Zapadnoy Sibiri: monografiya* [Soil Degradation of Ecosystems in the South of Western Siberia: Monograph]. Lodz: Poland. 2009. 636 p.
2. Ivanov V.D., Kuznetsova E.V. *Eroziya i okhrana pochv Tsentralnogo Chernozemya Rossii: uchebnoe posobie* [Erosion and Soil Protection of the Central Chernozem Region of Russia: Textbook]. Voronezh: VGU Publ. 2003. 360 p.
3. *Svodnyy analiticheskiy otechet o sostoyanii i ispolzovanii zemel Respubliki Kazakhstan za 2021 god* [Consolidated Analytical Report on the State and Use of Lands of the Republic of Kazakhstan for 2021]. Ministry of Agriculture of the Republic of Kazakhstan, Committee for Land Resources Management. Nur-Sultan. 2021. 334 p.
4. Lepekhin P.P., Teteryukov E.V. Development of land monitoring for subsoil use. *Zemleustroystvo, kadastr i monitoring zemel*. 2017. V. 146. No. 3. Pp. 49-53.
5. Lepekhin P.P. *Kompleksnyy monitoring zemel obektov Sakhalinskogo neftegazovogo kompleksa: dis. ... kand. geogr. nauk: 25.00.26* [Comprehensive Land Monitoring of the Sakhalin Oil and Gas Complex: Cand. Geogr. Sci. Diss.: 25.00.26]. Moscow: State University of Land Use Planning Publ. 2018. 188 p.
6. Khlystun V.N., Murasheva A.A., Stolyarov V.M. Conceptual approaches to the development and implementation of a program for involving unused agricultural lands in turnover. *Zemleustroystvo, kadastr i monitoring zemel*. 2022. No. 5. Pp. 285-293.
7. Concept of the Spatial Development Strategy of the Russian Federation for the Period up to 2030: Order of the Government of the Russian Federation No. 207-r of 13.02.2019. URL: <http://static.government.ru/media/files/UVAIqUtT08o60RktoOXI22JjAe7irNxc.pdf>.
8. Forecast Scheme of Territorial and Spatial Development of the Country up to 2030: Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan No. 185 of 09.10.2019. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U1900000185>.
9. Chibilev A.A., Levykin S.V., Kazachkov G.V. et al. Russian-Kazakhstani transboundary territory: experience of steppe ecosystem monitoring. *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*. 2023. V. 155. No. 9. Pp. 3-18.
10. Levykin S.V., Kazachkov G.V., Yakovlev I.G., Grudin D.A. Proposals for the conservation of landscape and biological diversity of steppes in the transboundary zone of the Orenburg Region of the Russian Federation and the Aktobe Region of the Republic of Kazakhstan. *Stepnoy byulleten*. 2020. No. 54. Pp. 4-12.
11. Rudneva O.S. Features of land use in the Russian-Kazakhstani steppe border areas (by the example of the eastern districts of the Orenburg Region and the Aytekebi District of the Aktobe Region). *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2021. No. 2(88). Pp. 145-150.
12. Volkov S.N., Shapovalov D.A. Digital land management – problems and prospects. *Interekspo Geo-Sibir*. 2019. V. 3. No. 2. Pp. 26-35.
13. Shapovalov D.A., Cherkashina E.V., Komarova S.I. Avenues for the Economic Assessment of Agricultural Lands in the Development of the Agricultural Industry. BIO Web of Conferences. 2021. Vol. 37. Art. 00088.
14. Rukhovich D.I., Shapovalov D.A. On the features of soil and land cover monitoring as an information basis for effective land use. *Zemleustroystvo, kadastr i monitoring zemel*. 2015. No. 9. Pp. 45-52.
15. Murasheva A.A., Stolyarov V.M., Melnikova A.A. Integral assessment of geoeological state as a method for involving unused lands in turnover. *Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal*. 2019. No. 5.
16. Murasheva A.A., Lepekhin P.P., Stolyarov V.M., Vdovenko A.V., Melnikova A.A. Formation of information and cartographic material for comprehensive cadastral works using modern technologies. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 867. Art. 012075.
17. Murasheva A.A., Stolyarov V.M., Lepekhin P.P., Rakhimberdina M., Toleubekova L. Optimization of information support for land use in transboundary territories. E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 510. Art. 04005.
18. Murasheva A.A., Lepekhin P.P., Stolyarov V.M., Melnikova A.A. Conceptual approaches to involving unused defense and security lands in turnover. *Journal of Agriculture and Environment*. 2023. No. 10(38).
19. Melnikova A.A., Murasheva A.A., Stolyarov V.M., Kamov L.P. Land monitoring: problems and improvement of information support. *Mezhdunarodnyy selskokhozyaystvennyy zhurnal*. 2019. No. 6(372). Pp. 46-49.
20. Otvagina M.G., Shapovalov D.A., Murasheva A.A. Comparison of comprehensive cadastral works and land inventory. *Moskovskiy ekonomicheskij zhurnal*. 2022. No. 7.
21. *Materialy filiala FGBU «Rosselkhoztentr» po Orenburgskoy oblasti o sovместnykh transgranichnykh obsledovaniyakh na vyvayavlenie osobo opasnykh vreditel'ey* [Materials of the Branch of the Federal State Budgetary Institution «Rosselkhoztentr» in the Orenburg Region on Joint Transboundary Surveys for the Identification of Especially Dangerous Pests]. 2026.
22. *Materialy filiala FGBU «Rosselkhoztentr» po Omskoy oblasti o sovместnykh monitoringovykh meropriyatiyakh po saranchovym vreditelyam i lugovomu motylku na prigranichnykh territoriyakh* [Materials of the Branch of the Federal State Budgetary Institution «Rosselkhoztentr» in the Omsk Region on Joint Monitoring Activities on Locust Pests and Meadow Moth in Border Areas]. 2025.
23. Bardakhanova T.B., Mikheeva A.S., Lopatkin D.A. et al. Comprehensive assessment of anthropogenic load on agricultural landscapes of transboundary territories of North Asia. *Mezhdunarodnyy selskokhozyaystvennyy zhurnal*. 2023. V. 66. No. 3(393). Pp. 250-255.

24. *O sostoyanii i ispolzovanii zemel selskokhozyaystvennogo naznacheniya Omskoy oblasti: analiticheskie materialy Upravleniya Rosselkhozнадзора po Omskoy oblasti* [On the State and Use of Agricultural Lands of the Omsk Region: Analytical Materials of the Rosselkhoznadzor Office for the Omsk Region]. Omsk. 2024.
25. *Materialy Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta o sovmestnoy obrazovatelnoy programme «Tsifrovoye upravlenie zemelnymi resursami» s Kazakhskim agrotekhnicheskim issledovatel'skim universitetom im. S.S. Seyfullina* [Materials of Omsk State Agrarian University on the Joint Educational Program «Digital Land Resources Management» with S. Seifullin Kazakh AgroTechnical Research University]. 2025.
26. Turegalieva Zh.T. Improvement of the methodology for land plot accounting based on modern technologies. *Molodoy uchenyy*. 2026. No. 10(613). Pp. 56-62.

**Сведения об авторах
Принадлежность к организации**

Лепехин Павел Павлович

кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры почвоведения, мелиорации и геоэкологии, Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

Мурашева Алла Андреевна

доктор экономических наук, профессор, Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

Черкашина Елена Вячеславовна

доктор экономических наук, доцент, Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

Груздев Владимир Станиславович

доктор географических наук, доцент, заведующий кафедрой строительства, Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

Столяров Виктор Михайлович

кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой управления земельными ресурсами и кадастров, Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

**Information about authors
Affiliations**

Lepekhin Pavel Pavlovich

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Soil Science, Melioration and Geoecology, State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Murasheva Alla Andreevna

Doctor of Economic Sciences, Professor, State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Cherkashina Elena Vyacheslavovna

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

Gruzdev Vladimir Stanislavovich

Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Construction, State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Stolyarov Viktor Mikhailovich

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Land Management and Cadastres, State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 29.07.2026 г.

АНАЛИЗ СВОЙСТВ ТЕКСТУРНЫХ ПРИЗНАКОВ ХАРАЛИКА И ПРИМЕРЫ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ТЕМАТИЧЕСКОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Коробкова Е.И.

Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия
e-mail: infxsup@gmail.com

Проведен комплексный сравнительный анализ распознавательных способностей всех 14 признаков Харалика. В ходе исследования была дана для каждого из 14 признаков полная характеристика по 14 ключевым параметрам и одинаковым для всех признаков (зависимость от поворота и ротационная инвариантность). Каждый из признаков Харалика был охарактеризован с примерами успешного использования в задачах дистанционного зондирования (обнаружение лесных пожаров, мониторинг морских аномалий, классификация растительности, сегментация радиолокационных изображений и т.д.). Полученные результаты позволят исследователям осознанно выбирать наиболее подходящие текстурные признаки, опираясь на детально обоснованные свойства каждого из них.

Ключевые слова: текстурные признаки Харалика, матрица смежности уровней серого (GLCM), дистанционное зондирование Земли, классификация изображений, инвариантность, вычислительная сложность.

ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF HARALICK TEXTURAL FEATURES OF THE IMAGE AND EXAMPLES OF THEIR USE FOR THEMATIC DECODING OF SPACE IMAGES

Korobkova E.I.

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

A comprehensive comparative analysis of the discriminative capabilities of all 14 Haralick features was carried out. For each of the 14 features, a complete characterization was based on 14 key parameters that were the same for all the features (dependence on rotation and rotational invariance). Each Haralick feature was characterized with the examples of successful use in remote sensing tasks (forest fire detection, monitoring of marine anomalies, vegetation classification, radar image segmentation, etc.). The obtained results will let researchers make informed choices of the most appropriate texture features, based on the thoroughly justified properties of each.

Keywords: Haralick textural features, gray level co-occurrence matrix (GLCM), remote sensing of the Earth, image classification, invariance, computational complexity.

Введение

В настоящее время при тематическом дешифрировании данных дистанционного зондирования Земли (ДЗ) широко используются текстурные признаки Харалика, однако порой исследователи используют их, не объясняя почему выбран тот или иной признак. Поэтому в настоящее время имеется необходимость провести анализ системы признаков и показать, какие из них являются оптимальными для решения тех или иных задач. Необходимо систематизировать признаки Харалика путем аналитического обзора, а также привести примеры их применения при решении тех или иных задач ДЗ и, соответственно, дать рекомендации.

Актуальность темы исследования обусловлена тем, что 14 текстурных признаков Харалика, предложенных в 1973 году [1], уже более 50 лет остаются золотым стандартом статистического текстурного анализа и активно применяются в задачах ДЗ, однако до сих пор не существует единого систематизированного источника, в котором все эти признаки были бы комплексно проанализированы по всему набору свойств. Большинство исследований ограничиваются рассмотрением и использованием при-

мерно лишь 3-5 наиболее популярных признаков, либо фокусируются на частных, специфических прикладных задачах, не давая целостной картины. Это вынуждает исследователей выбирать признаки эмпирическим путем, вместо того чтобы опираться на обоснованные рекомендации, что и определило необходимость настоящей работы. В данном исследовании была проведена оценка всех 14-ти признаков Харалика с классификацией по 16 параметрам.

При анализе космических изображений и работе с ними часто возникает ряд серьезных проблем, приводящих к зашумленности изображения: атмосферные помехи, разное пространственное разрешение, разное освещение и т.д. Соответственно, такие факторы прямо влияют на значения яркости, делая при этом традиционные методы классификации объектов, основанные только на спектральных каналах, недостаточно надежными [2]. В таких ситуациях применяют признаки Харалика, описывающие пространственные взаимоотношения пикселей и структуру, а не их абсолютные значения. Поэтому они являются устойчивыми к изменениям яркости и позволяют алгоритмам распознавать объекты на космических изображениях по их текстуре.

В качестве примера применения текстурных признаков Харалика можно привести исследования морских поверхностей по материалам космических съемок. В [3] для поиска температурных аномалий на поверхности моря в исследовании были выбраны 5 наиболее информативных признаков ($f_2, f_7, f_8, f_9, f_{11}$). В [4-5] для обнаружения зон апвеллинга по материалам космической съемки была выявлена устойчивая корреляция между признаками и температурой поверхности моря, смоделирована линейная зависимость для идентификации явления.

1. Текстурные признаки Харалика, их формулы и обозначения

В настоящей статье в дальнейшем признаки Харалика будут рассмотрены в записи формата f_n , где n – номер признака (от 1 до 14). Ниже приведена таблица (таблица 1), включающая в себя название признака на русском и английском языках, обозначение f_n , формулу. Под таблицей также приведены расшифровки всех обозначений, встречающихся в формулах, без дублирования.

Принятые обозначения:

$p(i,j)$ – вероятность перехода от яркости i к яркости j при заданном смещении, определяемом углом и расстоянием;

N_g – количество уровней серого в изображении после квантования;

n – абсолютная разность яркостей $|i-j|$;

μ_x, μ_y – средние отклонения частных распределений $p_x(i)$ и $p_y(j)$;

σ_x, σ_y – стандартные отклонения частных распределений $p_x(i)$ и $p_y(j)$;

$\mu = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} i \cdot p(i,j)$ – среднее значение яркости опорного пикселя (взвешенное по $p(i,j)$);

$p_{x+y}(k)$ – сумма вероятностей $p(i,j)$ для всех пар, где сумма яркостей $i+j$ равна заданному k ; $p_{x+y}(k) = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} i \cdot p(i,j)$, $k=i+j=2,3,\dots,2N_g$;

$i+j$ – возможное значение суммы яркостей двух пикселей;

μ_{x+y} – суммарное среднее;

$p_{x-y}(k)$ – распределение вероятностей, показывающее частоту встречаемости пар пикселей с абсолютной разностью уровней серого, равной k , т.е. $|i-j|=k$;

μ_{x-y} – разностное среднее (difference average), т.е. среднее значение всех разностей яркости в матрице смежностей уровней серого (центрирующий параметр);

$p_{x-y}(i)$ – распределение вероятностей, показывающее частоту встречаемости пар пикселей с определенной разностью i (от 0 до N_g-1);

$HXY = -\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i,j) \log p(i,j)$ – энтропия совместного распределения яркостей опорного и соседнего пикселей;

$HX = -\sum_{i=1}^{N_g} p_x(i) \log p_x(i)$ – энтропия частного распределения опорного пикселя p_x ;

$HY = -\sum_{j=1}^{N_g} p_y(j) \log p_y(j)$ – энтропия частного распределения соседнего пикселя p_y ;

$HXY1 = -\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i,j) \log \{p_x(i)p_y(j)\}$ – энтропия распределения, предполагающего независимость i и j ;

$HXY2 = -\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p_x(i)p_y(j) \log \{p_x(i)p_y(j)\}$ – энтропия совместного распределения, построенного как произведение частных распределений p_x и p_y , в

Таблица 1

Формулы, названия и обозначения текстурных признаков Харалика [1]

Текстурный признак Харалика	Формула	Текстурный признак Харалика	Формула
Второй угловой момент (Angular Second Moment, ASM)	$f_1 = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} \{p(i,j)\}^2$	Суммарная энтропия (Sum Entropy)	$f_8 = -\sum_{k=2}^{2N_g} p_{x+y}(k) \log \{p_{x+y}(k)\}$
Контраст (Contrast)	$f_2 = \sum_{n=0}^{N_g-1} n^2 \left\{ \sum_{ i-j =n} p(i,j) \right\}$	Энтропия (Entropy)	$f_9 = -\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i,j) \log p(i,j)$
Корреляция (Correlation)	$f_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} (i \cdot j) p(i,j) - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y}$	Разностная дисперсия (Difference Variance)	$f_{10} = \sum_{k=0}^{N_g-1} (k - \mu_{x-y})^2 \cdot p_{x-y}(k)$
Сумма квадратов – дисперсия (Sum of Squares: Variance)	$f_4 = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} (i - \mu)^2 p(i,j)$	Разностная энтропия (Difference Entropy)	$f_{11} = -\sum_{i=0}^{N_g-1} p_{x-y}(i) \cdot \log(p_{x-y}(i))$
Обратный разностный момент (Inverse Difference Moment, IDM)	$f_5 = \text{IDM} = \sum_{i=1}^{N_g-1} \sum_{j=1}^{N_g-1} \frac{1}{1 + (i-j)^2} \cdot p(i,j)$	Информационная мера корреляции 1 (Information Measure of Correlation 1, IMC1)	$f_{12} = \frac{HXY - HXY1}{\max\{HX, HY\}}$
Суммарное среднее (Sum Average)	$f_6 = \sum_{k=2}^{2N_g} k \cdot p_{x+y}(k)$	Информационная мера корреляции 2 (Information Measure of Correlation 2, IMC2)	$f_{13} = \sqrt{1 - \exp^{-2,0 \cdot (HXY2 - HXY)}}$
Суммарная дисперсия (Sum Variance)	$f_7 = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} (i + j - \mu_{x+y})^2 \cdot p(i,j)$	Максимальный коэффициент корреляции	$f_{14} = \sqrt{\lambda_2(Q)}$

предположении независимости i и j ;

$\lambda_2(Q)$ – второе по величине собственное значение матрицы Q ; $Q(i,j)=\sum_{k=1}^{N_g}(p(i,k) \cdot p(j,k))/(p_x(i) \cdot p_y(k))$;

$p_x(i)=\sum_{j=1}^{N_g}p(i,j)$ – частное распределение вероятностей для опорного пикселя;

$p_y(k)=\sum_{i=1}^{N_g}p(i,j)$ – частное распределение вероятностей для соседнего пикселя.

2. Параметры текстурных признаков Харалика

2.1. Функциональные группы

Текстурные признаки Харалика можно структурировать по 3-м функциональным группам [1], что позволяет упорядочить их, а также облегчить выбор необходимых мер в зависимости от поставленной задачи:

1) *Группу упорядоченности (orderliness group)*, характеризующую степень регулярности и предсказуемости текстурной структуры (упорядоченность – при высоких значениях, хаотичность – при низких): признаки f_1, f_9 . Признаки этой группы позволяют оценить регулярность текстурной структуры, что крайне важно для классификации городских и природных ландшафтов [6-7].

2) *Группу контраста (contrast group)*, оценивающую локальные яркости, фиксируя величину различий между соседними пикселями (большие перепады яркости – при высоких значениях): признаки f_2, f_5 . Группа контраста объединяет признаки, описывающие локальные вариации яркости. Они количественно измеряют, насколько интенсивно меняются значения от пикселя к пикселю, и позволяют эффективно отделять обрабатываемые участки от фона, в частности, для выделения сельскохозяйственных полей [8].

3) *Группу статистики (statistics group)*, описывающую разброс, среднее и линейные зависимости между пикселями, а также распределение значений в матрице смежностей уровней серого (GLCM), применяя к ней классические статистические показатели: признаки f_3, f_6, f_7, f_8 . Признаки этой группы применяют при классификации сложных, неоднородных объектов, например, для различия между разными типами облаков, типами снега (сухой, мокрый, тающий) [9].

Признаки $f_{10}-f_{14}$ можно также отнести к группе статистики, но учитывая, что они вспомогательные, можно выделить их в отдельную группу статистики 2-го порядка. Деление текстурных признаков Харалика на группы очень полезно на практике. Комбинирование различных признаков друг с другом дает хорошие результаты. Например, в сочетании текстурных признаков обучили классификатор случайного леса для разделения пахотных земель и пустошей: применение GLCM позволило повысить точность разделения объектов с 93.8 до 97.3% [10].

2.2. Инвариантность к монотонным преобразованиям яркости

Инвариантность к монотонным преобразованиям яркости представляет собой одно из ключевых свойств, вытекающих напрямую из математической структуры текстурных признаков Харалика. В оригинальной работе Харалика [1] было определено, что 7 текстурных признаков ($f_1, f_8, f_9, f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{14}$) из 14-ти полностью инвариантны к любым монотонным преобразованиям. Данное свойство обусловлено тем, что эти признаки основаны на вероятностях $p(i,j)$, остающихся неизменными при монотонных преобразованиях. Остальные 7, неинвариантных признаков ($f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_{10}$) зависят от абсолютных значений и разностей уровней серого.

Признаки Харалика, инвариантные к яркости, востребованы в некоторых задачах ДЗ, таких как, например, выявление регулярности текстурной структуры для идентификации растительности или городских территорий [11]; оценка сложности и степени хаотичности изображения для классификации сложных сочетаний объектов на космических изображениях [12].

2.3. Инвариантность к квантованию. Масштабируемость

При работе с текстурными признаками Харалика вопрос квантования уровней серого N_g является наиболее чувствительным аспектом.

Квантование – процесс приведения исходного значения яркости пикселя к одному из небольшого числа дискретных уровней.

Проблематичность воспроизводимости вычислений связана с зависимостью от выбора количества уровней серого тона (или чувствительностью космического датчика N_g). Из-за слишком малого значения N_g можно упустить более мелкие детали на космических изображениях. Из-за слишком большого значения N_g в большинстве ячеек будут нули, GLCM становится очень большой и разреженной. В обоих случаях главную проблему исследований признаков Харалика по материалам космической съемки представляет зависимость от субъективного выбора параметра, подбора оптимального значения N_g . В итоге, одним из предложенных методов [11] стала инвариантность к квантованию (независимость итоговых признаков от N_g), что является особенно важным для ДЗ.

В результате современных исследований [12-14] были выявлены 4 математические зависимости $f(N_g)$, которым следуют значения признаков при изменении количества уровней квантования N_g . Среди них:

1) *Асимптотическая инвариантность* предопределяет GLCM как функцию плотности вероятности, асимптотически инвариантной к квантованию. При этом исходные признаки без этой зависимости чувствительны к N_g .

2) *Квадратичное масштабирование*: значения текстурных признаков Харалика при увеличении N_g

растут квадратично (например, при увеличении N_g в 2 раза значение признака вырастет примерно в 4 раза).

3) *Линейное масштабирование*: значения текстурных признаков Харалика при увеличении N_g растут пропорционально (например, при увеличении N_g в 2 раза значение признака вырастет примерно в 2 раза).

4) *Логарифмическое масштабирование* (f_9): значение энтропии растет по логарифмическому закону. По сравнению с квадратичным масштабированием изменение N_g в данном случае будет оказывать на признаки Харалика более слабое влияние.

В своей стандартной формулировке f_1 не является инвариантным к квантованию, поскольку исходная GLCM строится на абсолютном числе N_g , изменение которых изменяет размерность и плотность GLCM, что приводит к изменению вычисляемых вероятностей $p(i,j)$ и, как следствие, значения f_1 . Исследование Löfstedt [12] показало, что существует метод, позволяющий сделать f_1 асимптотически инвариантным к квантованию и заключающийся в переопределении GLCM как дискретизированной функции плотности вероятности.

Квадратичный закон масштабирования относительно N_g соответствует признакам f_2, f_3, f_5, f_7 , [13-14]. Линейный закон масштабирования относительно N_g соответствует признакам f_6, f_{10} [13]. Логарифмический закон масштабирования относительно N_g соответствует признаку f_9 [13].

2.4. Вычислительная сложность

Вычислительная нагрузка всех признаков Харалика связана с построением GLCM и перебором всех ячеек этой матрицы, что определяет базовую вычислительную сложность на уровне $O(N_g^2)$ для одного направления. Эта величина квадратично зависит от числа N_g – это особенно актуально для спутниковых снимков с исходной высокой битностью (например, данные Sentinel-2, 16 бит). Основное различие между признаками связано с дополнительными операциями, необходимыми для их вычисления. По вычислительной сложности признаки Харалика можно классифицировать следующим образом (табл. 2).

Для работы с космическими изображениями необходима оптимизация, поскольку вычисление признаков Харалика требует больших ресурсов памяти и времени. Соответственно главными ограничениями являются высокая вычислительная стоимость и требования к памяти. Параллельные вычисления на GPU позволяют обрабатывать большие объемы данных космических изображений за короткое время. Применение технологии GPU-ускорения с OpenCL в сегментации спутниковых SAR-изображений достигло ускорения в 340 раз по сравнению с последовательной CPU-версией [15]. Технологии CUDA обеспечили ускорение вычислений GLCM и признаков Харалика в 50 раз для изображений с разным пространственным разрешением [16].

2.5. Корреляция с другими признаками

Корреляция между признаками Харалика напрямую влияет на эффективность анализа космических изображений. В задачах ДЗ понимание взаимосвязи между текстурными признаками позволяет сократить вычислительные затраты, повысить интерпретируемость результатов. Большинство признаков Харалика математически коррелируются, либо описывают похожие статистические свойства. Соответственно, они зачастую дублируют информацию, поэтому использование всех признаков одновременно необязательно (табл. 3).

2.6. Применимость (выявление границ/внутренняя структура)

При анализе космических изображений зачастую объекты, внешне различимые по своей структуре (например, лес и пашня), могут иметь схожие спектральные характеристики, что затрудняет их разделение. В таком случае применяют текстурные признаки Харалика, способные улавливать пространственные особенности, являющиеся мощным инструментом для повышения точности классификации путем анализа текстурной структуры – решения важной проблемы ДЗ.

Признаки Харалика на практике можно разделить на две функциональные группы: выделяющие границы между различными объектами и характеризующие внутреннюю структуру объектов [17]. Подобное деление позволяет выбрать наиболее

Таблица 2

Классификация признаков по вычислительной сложности

Вычислительная сложность	Признаки Харалика	Описание вычисления и основных операций
Низкая	$f_1, f_2, f_4, f_5, f_{10}$	Минимальное количество дополнительных операций (квадратов, взвешенных сумм) на каждой ячейке GLCM. Основные вычисления: на основе базовых сумм.
Средняя	f_3, f_6, f_7	Требуется предварительный расчёт вспомогательных статистик (среднее, дисперсия) для всей GLCM.
Высокая	f_8, f_9, f_{11}	Требуется вычисление логарифмов для каждой ячейки GLCM (для f_9) или для распределений сумм/разностей (для f_8, f_{11}); нагрузка таким образом увеличивается.
Очень высокая	f_{12}, f_{13}, f_{14}	Требуется многократное вычисление логарифмов и решение задач на собственные значения. Данные признаки можно назвать вычислительно обременительными, в особенности для изображений с высоким разрешением. На практике часто не рассчитывается из-за вычислительной нестабильности.

информативные характеристики для решения конкретной задачи (табл. 4).

2.7. Дискриминационная сила и визуальная интерпретация

Дискриминационная сила текстурных при-

знаков Харалика – их способность количественно разделять различные типы земного покрова по их текстурной структуре. Она имеет прямую связь с визуальным восприятием: текстурные признаки Харалика описывают не цвет или яркость пикселя, а

Таблица 3

Корреляционные связи между признаками Харалика

Признак Харалика	Корреляция	Описание
f_1	Высокая отрицательная с f_9	Признаки измеряют противоположные свойства: f_1 – упорядоченность, а f_9 – неупорядоченность (обратная взаимосвязь).
f_2	Высокая с f_4, f_{10}	Признаки описывают разброс значений яркости.
f_3	Высокая с f_{12}, f_{13}	Выявляют взаимозависимости в текстуре.
f_4	Высокая с f_2, f_{10}	Признак f_4 аналогично f_2 , является мерой дисперсии (разброса) и сильно коррелирует с f_2, f_{10} .
f_5	Высокая отрицательная с f_2	f_5 противоположен признаку f_2 , и достигает максимума там, где локальные вариации яркости минимальны, и наоборот.
f_6	связан с f_7	Признаки описывают распределение сумм яркостей пар пикселей, они связаны между собой математически.
f_7	связан с f_6	Аналогично f_6 .
f_8	Высокая с f_9, f_{11}	Признаки характеризуют сложность распределения вероятностей.
f_9	Высокая отрицательная с f_1 ; Высокая с f_9, f_{11}	Аналогично f_1 . Аналогично f_9 .
f_{10}	Высокая с f_2, f_4	Признаки связаны с вариативностью яркости.
f_{11}	Высокая с f_8, f_9	Аналогично f_9 .
f_{12}	Высокая с f_3, f_{13}	Признаки оценивают взаимосвязь между пикселями.
f_{13}	Высокая с f_3, f_{12}	Аналогично f_{12} .
f_{14}	Низкая / нестабильность	Связь с другими признаками нестабильна и варьируется в зависимости от данных.

Таблица 4

Применимость признаков Харалика

Признак Харалика	Применимость	Описание
f_1	Внутренняя структура	Характеризует степень упорядоченности, предсказуемость, отсутствие разнородных элементов в структуре объекта.
f_2	Выявление границ	Является прямой мерой локальных вариаций яркости. Сильно коррелирует с визуальными границами.
f_3	Внутренняя структура	Отражает линейную зависимость яркостей в паре пикселей. Характеризует внутреннюю упорядоченность объекта.
f_4	Выявление границ	Выделяет границы между различными объектами, связан с f_2 . Отвечает за вариативность яркостей.
f_5	Внутренняя структура	Обнаруживает сходство в интенсивности между соседними пикселями. Обратен к f_2 .
f_6	Смешанная (Внутренняя структура/ выявление границ)	Используется вместе с f_2 для наиболее полной характеристики текстуры.
f_7	Выявление границ	Аналогично f_4 выделяет границы объекта, характеризует вариативность яркостей.
f_8	Выявление границ	Выделяет границы объектов, является мерой сложности.
f_9	Смешанная (Внутренняя структура/ выявление границ)	Зависит от конкретного ландшафта, поэтому её применимость не является фиксированной. Является мерой сложности.
f_{10}	Выявление границ	Измеряет вариативность яркостей, что напрямую связано с выделением границ и контрастом.
f_{11}	Выявление границ	Выделяет границы объектов, является мерой сложности.
f_{12}	Внутренняя структура	Описывает сложные, нелинейные зависимости внутри текстуры.
f_{13}	Внутренняя структура	Описывает сложные, нелинейные зависимости внутри текстуры.
f_{14}	Нестабильность (теоретически внутренняя структура)	Вычислительно нестабильный, т.к. требует решения задачи на собственные значения.

пространственную структуру ландшафта – зернистость, регулярность, контрастность, гладкость изображения. Эта визуальная интерпретация позволяет человеческому глазу улавливать внутреннюю струк-

туру изображения, делая текстурные признаки Харалика важным инструментом для повышения точности и информативности при анализе космических изображений (табл. 5).

Таблица 5

Применимость признаков Харалика

Признак Харалика	Дискриминационная роль (что измеряет)	Связь с визуальным восприятием	Применение в дистанционном зондировании
f_1	Измеряет степень однородности и упорядоченности. Применяется для разделения ровных и регулярных участков.	При высоких значениях поверхность визуально гладкая, ровная (например, водная поверхность, поле); при низких – структура хаотичная, пестрая.	Классификация городских ландшафтов: разделение типов землепользования и классификация растительности [18], [19].
f_2	Эффективно выделяет границы и резкие перепады яркостей. Является мерой локальной контрастности.	При высоких значениях границы между объектами визуально четкие, резкие; при низких – размытые переходы, гладкие области.	Картографирование лесной растительности и оценка ее состояния [18]. Анализ и сегментация одноканальных изображений [20]. Обнаружение пожаров [21].
f_3	Измеряет степень линейной зависимости яркости между соседними пикселями.	При высоких значениях элементы визуально протяженные, повторяющиеся (например, горные гряды, ряды посевов).	Геологическое картографирование и разведка полезных ископаемых [22]. Обнаружение зон апвеллинга на морской поверхности [4-5]. Классификация растительности.
f_4	Характеризует общую разнородность и вариативность. Является мерой разброса значений яркости.	При высоких значениях ландшафт визуально мозаичный, пестрый.	Анализ и сегментация одноканальных изображений [20].
f_5	Ищет сходство соседних пикселей, измеряет локальную гладкость. Является противоположностью контрасту.	При высоких значениях поверхность визуально гладкая, ровная (например, водная поверхность, песчаный пляж).	Анализ и сегментация одноканальных изображений [20].
f_6	Является мерой общей интенсивности с учетом структурной неоднородности.	Соответствует визуальной оценке средней яркости и ее текстуры.	Классификация почвенно-растительных объектов и повышение информативности космических изображений [19], [23]. Обнаружение вырубок в тропических лесах [24].
f_7	Измеряет разброс значений суммарной яркости. Характеризует изменчивость общей интенсивности текстурной структуры.	При высоких значениях визуально сильно чередуются темные и светлые участки.	Распознавание природных и городских ландшафтов, повышение точности классификации при совместном использовании текстурных и спектральных признаков [23]. Мониторинг морского шельфа и поиск углеводородов [3].
f_8	Выявляет сложную, хаотичную структуру. Является мерой неоднородности распределения сумм яркостей.	При высоких значениях визуально видна высокая сложность текстуры, связанной с суммарными яркостями.	Оценка состава и классификация лесной растительности. Мониторинг морского шельфа и поиск углеводородов [25].
f_9	Применяется для разделения простых и сложных, нерегулярных текстур. Является мерой сложности.	При высоких значениях текстура визуально очень сложная, хаотичная, неоднородная (кроны деревьев).	Анализ и сегментация одноканальных изображений [20]. Обнаружение зон апвеллинга на морской поверхности [4-5].
f_{10}	Является мерой вариативности разностей яркостей (локального контраста)	Соответствует визуальной оценке изменчивости контраста.	Анализ и сегментация одноканальных изображений [20].
f_{11}	Является мерой неупорядоченности в распределении локального контраста.	При высоких значениях визуально видны очень разнообразные по величине локальные перепады (городская застройка).	Повышение точности классификации [23]. Мониторинг морского шельфа и поиск углеводородов [25].

Таблица 5 (Продолжение)

f_{12}	Описывают нелинейные зависимости между пикселями.	Визуально соответствует сложным, структурированным, но необязательно линейным текстурам.	Обнаружение зон апвеллинга на морской поверхности [4-5].
f_{13}	Оценивает максимальную корреляцию между пикселями. Имеет теоретическую ценность, однако на практике вычислительно нестабилен: поиск собственных значений часто не сходится.	Применение на практике часто исключается из анализа из-за частых ошибок вычисления.	Часто не рассчитывается на практике: в большинстве программ опускается из-за сложности и нестабильности его вычислений.

2.8. Чувствительность к размеру смещения

При анализе космических изображений неоднородность объектов представляет собой важную проблему: одни и те же типы растительности или городского ландшафта могут выглядеть по-разному в зависимости от пространственного масштаба. Значения текстурных признаков Харалика, описывающих пространственную текстуру, позволяют решить данную проблему, однако их значения сильно зависят от выбора смещения d (расстояние между пикселями и угол между ними). Подбор данного параметра напрямую связан с масштабом (размером) текстурных элементов на космическом изображении: для мелкозернистой текстуры требуется малое смещение, для крупнозернистой – большее. Понимание закономерностей чувствительности признаков Харалика к изменению смещения важно для настройки алгоритмов классификации объектов на космических изображениях. Чувствительность признаков Харалика к смещению можно классифицировать на 5 типов: умеренно-слабую, низкую, среднюю, высокую, очень высокую, нестабильную.

1) Умеренно-слабая:

Для f_1 значения заметно снижаются с ростом смещения d . Максимальная информативность достигается при малых смещениях (для $d=1$ или $d=3$) для обнаружения локальной неоднородности [13,26].

2) Низкая:

Признак f_6 – самый устойчивый признак. Изменение смещения в данном случае слабо влияет на значения, что является крайне важным для мониторинга однородных объектов (например, лесных массивов) [13].

3) Средняя:

Признак f_2 быстро увеличивается с ростом смещения d , является чувствительным к направлению. Позволяет эффективно выявлять границы объектов при использовании смещений, кратных размеру структурных элементов [26,13]. f_4 увеличивается с ростом смещения d . Показывает высокую чувствительность к изменению текстурных масштабов и разнородности [27]. f_9 заметно увеличивается с ростом смещения d . Позволяет выявлять сложность и хаотичность текстурных структур [13]. f_{10} (поведе-

ние схоже с f_2 и f_4) и f_{11} (поведение схоже с f_8 и f_9) чувствительны к смещению d .

4) Высокая:

Признак f_3 наиболее чувствителен к смещению d , требует точной настройки. Позволяет улавливать линейные структуры и повторяющиеся элементы ландшафта [13]. f_7 (поведение схоже с f_2) имеет высокую чувствительность при выборе смещений d , кратных размеру текстурных элементов. f_8 очень чувствительна к изменению смещения d , демонстрируя рост с его увеличением. Является эффективным признаком для анализа сложных структур. f_{12} и f_{13} измеряют сложность и линейные зависимости в текстуре. Для получения устойчивых к повороту значений их принято усреднять по всем направлениям (0° , 45° , 90° , 135°), в противном случае их значения будут сильно зависеть от ориентации объектов на космическом изображении.

5) Очень высокая:

Признак f_5 резко снижается с увеличением d . Позволяет эффективно выделять локальные гладкости и однородности исключительно при малых смещениях [13].

6) Нестабильная:

f_{14} вычислительно сложен и нестабилен, поскольку требует поиска собственных значений, ввиду чего часто не используется. Чувствительность к другим параметрам GLCM крайне высокая, поэтому f_{14} не является надежным признаком для практического анализа космических изображений.

2.9. Вычислительная стабильность

При анализе космических изображений наблюдается проблема, связанная с обработкой больших массивов данных и необходимостью воспроизводить результаты в разных условиях съемки. В данном контексте вычислительная стабильность признаков Харалика подразумевает собой устойчивость к изменению входных параметров (число уровней квантования, масштаб, направление) и собственную вычислительную стабильность и надежность алгоритма. При работе с признаками Харалика всегда выделяют f_{14} , он, как было описано выше, наиболее вычислительно нестабильный. Каждый текстурный признак Харалика с точки зрения их вычислительной стабильности можно охарактеризовать как:

потенциально нестабильный, крайне низкий, низкий, средний, стабильный.

1) Потенциальная нестабильность: f_3 .

Значение f_3 напрямую зависит от дисперсии яркостей пикселей в анализируемом окне: если оно охватывает абсолютно однородную область, в которой все пиксели имеют одинаковое значение (например, водная поверхность), дисперсия будет равна 0. В таком случае в знаменателе формулы f_3 окажется 0, что вызовет деление на 0 и сделает результат вычислений некорректным (при значении NaN — Not a Number).

2) Крайне низкая стабильность: f_{14} .

Признак f_{14} , как было неоднократно отмечено выше, часто не вычисляется из-за вычислительной нестабильности и сложности поиска собственных значений [28].

3) Низкая стабильность: f_{12}, f_{13} .

Признак f_{12} — сложные логарифмические выражения, потенциальные численные проблемы. f_{13} — проблемы с квадратным корнем из отрицательного числа.

4) Средняя стабильность: f_8, f_9, f_{11} .

Признак f_8 — требуются операции логарифмирования, что вносит вычислительную нагрузку. f_9 — для предотвращения ошибок при логарифмировании нулевых вероятностей в разреженных GLCM при расчете добавляют фиксированную малую константу ε , что может приводить к незначительным численным погрешностям. f_{11} — является мерой беспорядка в изменениях яркости на космическом изображении. Единственная вычислительная сложность связана с безопасным расчетом логарифма: прямое вычисление $\log(0)$ вызвало бы ошибку, т.к. в GLCM много нулевых вероятностей. Во избежание ошибки либо искусственно добавляют небольшую константу к значениям $(p+\varepsilon)$, либо применяют специальное условие, чтобы не вычислять логарифм для нулевых элементов [13].

5) Стабильность: $f_p, f_2, f_p, f_3, f_6, f_7, f_{10}$.

Признак f_1 вычисляется прямой суммой квадратов, без критических операций элементов. f_2 основан на взвешенных суммах, не требует логарифмирования или сложных операций. f_4 вычисляется через сумму квадратов отклонений, не требует сложных операций. f_5 основан на взвешенной сумме с обратными весами. f_6 вычисляется через распределение сумм; линейное масштабирование. f_7 — второй момент распределения сумм; линейное масштабирование. f_{10} основан на распределении сумм; линейное масштабирование без логарифмов [13].

2.10. Класс вычислительной сложности

При анализе космических изображений класс вычислительной сложности алгоритма определяет, насколько быстро он может обрабатывать большие массивы спутниковых данных. Выделяют три класса: линейный ($O(N)$) — наиболее предпочтительный

для массовой обработки, подходит для больших снимков, квадратичный ($O(N^2)$) — допустим лишь при малых размерах анализируемых окон, кубический ($O(N^3)$) — слишком медленный для типичных космических изображений, практически неприменим для высокодетальных сцен.

Текстурные признаки Харалика, рассчитанные для одного направления, имеют квадратичную вычислительную сложность $O(N^2)$ относительно размера матрицы GLCM. Поскольку размер GLCM определяется количеством уровней квантования N_g , то их удвоение приводит к увеличению числа ячеек GLCM в 4 раза и, соответственно, к резкому замедлению расчетов. Ввиду этого на практике применяется двухступенчатая оптимизация: исходное изображение (например, 8 бит, 256 уровней серого) квантуется до небольшого числа уровней серого (например, 16), что резко сокращает размер GLCM. Далее по уменьшенной GLCM вычисляются текстурные признаки Харалика.

Таким образом, уменьшая детализацию яркости, удастся избежать кубического или более высокого роста вычисления, облегчая обработку космических изображения. Текстурные признаки Харалика можно разделить на следующие классы вычислительной сложности: $O(N^2) \rightarrow O(N)$, $O(N^2)/O(N^3)$, $O(N^2)$, $O(N^3)$ [1,29].

1) квадратичная ($O(N^2)$) с возможностью оптимизации до линейной ($O(N)$): $f_6, f_7, f_8, f_{10}, f_{11}$.

2) квадратичная ($O(N^2)$) или кубическая ($O(N^3)$): f_{12}, f_{13} .

3) квадратичная ($O(N^2)$): $f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_9$.

4) кубическая ($O(N^3)$): f_{14} .

2.11. Ресурсоемкость (RAM) и энергопотребление

При анализе космических изображений ресурсоемкость и энергопотребление являются критически важными аспектами. Основной проблемой при вычислении признаков Харалика является размер GLCM (даже для вычислительно простых признаков ($f_1, \dots, f_9$)), от которого зависит потребление памяти, вычислительная нагрузка, энергозатраты и время обработки изображения. Требуется адаптация традиционных методов или применение специального оборудования для решения задач ДЗ. Признаки Харалика можно классифицировать по уровню энергопотребления и ресурсоемкости: среднее, высокое, очень высокое, крайне высокое.

1) Среднее: f_6, f_7, f_{10} (f_8, f_{11} — только по памяти).

1.1) Ключевые факторы, влияющие на энергопотребление и ресурсоемкость: признаки, которые могут быть эффективно вычислены через одномерные гистограммы, а не через полную GLCM, а также возможность вычислить f_6, f_7, f_{10} через вспомогательные гистограммы, что требует значительно меньше памяти, чем полная GLCM.

2) Высокое: $f_1, f_2, f_4, f_5, f_8, f_{11}$.

2.1) Ключевые факторы, влияющие на энергопотребление и ресурсоемкость: признаки на основе прямого обхода всех ячеек GLCM с дополнительными арифметическими операциями (квадрат, деление, логарифм); прямой перебор всех ячеек GLCM для f_1, f_2, f_4, f_5 ; использование операций логарифмирования увеличивает энергозатраты для f_8, f_{11} .

3) Очень высокое: f_3, f_9 .

3.1) Ключевые факторы, влияющие на энергопотребление и ресурсоемкость: признаки, требующие как множественных проходов по всей GLCM, так и тяжелых математических операций на каждом шаге.

4) Крайне высокое: $f_7, f_9, f_{12}, f_{13}, f_{14}$.

4.1) Ключевые факторы, влияющие на энергопотребление и ресурсоемкость: Алгоритмы с очень высокой вычислительной сложностью и множественными проходами по данным. f_3 требует многократного перебора GLCM. f_9 требует операции логарифмирования для каждой ячейки GLCM. f_{12}, f_{13} требуют многократных логарифмических операций и вычисления сложных сумм. f_{14} требует хранения матрицы Q и выполнения решения задачи на собственные значения.

2.12. Стабильность к размеру скользящего окна (ROI)

При анализе космических изображений размер скользящего окна является одним из ключевых параметров, влияющих на значения текстурных признаков Харалика. При выборе слишком маленького окна не получится захватить полную структуру текстуры, при выборе слишком большого окна текстурные характеристики разнородных объектов будут усреднены, а вычислительные затраты на обработку космических изображений вырастут. Можно сделать вывод, что стабильность признаков Харалика к изменению размера скользящего окна напрямую определяет их воспроизводимость и надежность при классификации. Текстурные признаки Харалика можно разделить по их чувствительности к размеру скользящего окна на [17,20]:

1) Чувствительные к масштабу (низкий уровень стабильности): f_2, f_4, f_9 наиболее подвержены влиянию размера скользящего окна, они предназначены для обнаружения локальных вариаций, границ и перепадов яркостей. Увеличение окна может привести к усреднению этих деталей и искажению значений.

2) Устойчивые к масштабу (высокий уровень стабильности): f_1, f_3, f_5 характеризуют однородность и регулярность внутренней текстурной структуры. Они демонстрируют наибольшую устойчивость к изменению размера окна и обеспечивают более стабильные оценки для крупных однородных объектов.

3) Нестабильные (контекстно-зависимый уровень стабильности): f_9, f_{12}, f_{13}, f_9 потенциально

нестабильна при изменении масштаба. f_{12}, f_{13} также имеют вычислительную сложность и потенциальную нестабильность, что связывает их и с зависимостью от масштаба.

2.13. Чувствительность к шуму/экспозиции

При анализе космических изображений шум и вариации экспозиции (освещенность, время выдержки) представляют собой проблему, поскольку могут кардинально исказить текстурные характеристики объектов. Разные признаки Харалика обладают различной устойчивостью к этим искажениям. Уровень шума и разрешение изображения оказывают значительное влияние на большинство текстурных признаков, причем величина эффекта варьируется между разными признаками. Значения признаков Харалика сильно зависят от экспозиции, но при этом существуют области экспозиции, в которых они становятся инвариантными [30-31]. Текстурные признаки Харалика можно обобщенно классифицировать по их чувствительности к шуму и экспозиции, разделив на следующие уровни стабильности:

1) Крайне низкий (сильно зависят от шума и параметров съемки): f_3, f_{12}, f_{13} .

Эти текстурные признаки наиболее чувствительны к шуму из-за своей зависимости от дисперсии и линейных связей между пикселями. Требуют особой осторожности при интерпретации на зашумленных данных.

2) Низкая (заметно зависят от шума/экспозиции): f_2, f_8, f_9, f_{11} .

f_2 напрямую зависит от перепадов яркости, которые могут быть вызваны шумом. f_8, f_9, f_{11} чувствительны к добавлению случайных возмущений, увеличивающих «хаос» (т.к. энтропия – мера сложности, хаоса) на изображении.

3) Средняя (стабильны в определенных диапазонах экспозиции/при предобработке): f_7, f_{10}, f_{14} .

f_7, f_{10} могут быть стабилизированы при определенных условиях съемки. f_{14} часто опускается из-за вычислительной нестабильности, что также делает его непредсказуемым при работе с зашумленными данными.

4) Высокая (относительно устойчивы к шуму): f_1, f_4, f_5, f_6 .

Эти текстурные признаки менее чувствительны к шуму, так как они сглаживают вариации. Квантование уровней серого при этом также оказывает сглаживающий эффект, снижающий влияние шума на результирующие признаки.

2.14. Интерпретируемость

При анализе космических изображений интерпретируемость текстурного признака представляет собой то, насколько он понятен для человека и то, насколько возможно связать числовое значение с конкретным текстурным свойством (регулярностью, контрастом, гладкостью). Привычка опираться на

зрительное восприятие может стать проблемой для сложных корреляционных мер (f_{12}, f_{13}, f_{14}) и комбинированных энтропийных индексов (f_8, f_{11}), что часто приводит к неполному использованию их потенциала в прикладных задачах ДЗ. Текстурные признаки Харалика можно классифицировать по следующим уровням интерпретируемости:

1) Высокий (интуитивно понятны): f_1, f_2, f_5, f_9 четко соотносятся с визуальным восприятием (контрастность, гладкость, хаотичность, упорядоченность); напрямую описывают конкретное визуальное свойство и часто отбираются как наиболее значимые.

2) Средний (понятны при анализе): $f_3, f_4, f_6, f_7, f_{10}$ требуют пояснений (корреляция = линейная зависимость между соседними пикселями), но их смысл достаточно прозрачен; являются статистическими мерами распределения яркостей.

3) Низкий (требуют специальных знаний): f_8, f_{11} являются усложненными энтропийными мерами, которые, хотя и несут информацию о нерегулярности и сложности, интерпретируются сложнее, чем f_9 .

4) Очень низкий (абстрактные меры): f_{12}, f_{13}, f_{14} являются малоинтуитивными информационно-теоретическими мерами корреляции; f_{12}, f_{13} требуют сложных вычислений, а f_{14} из-за крайней вычислительной нестабильности часто опускается на практике.

При анализе текстурных признаков Харалика ключевым моментом является то, что направленность и ротационная инвариантность представляют собой разные состояния одного и того же свойства (чувствительности к углу, или ориентации) и применяются ко всем 14-ти признакам без исключения. Все признаки Харалика изначально зависимы от поворота (направления), они демонстрируют высокую чувствительность к ориентации и могут давать разные значения для одного и того же участка изображения, повернутого на другой угол.

2.15. Зависимость от поворота (направления) – высокая для всех признаков

Матрица смежности уровней серого (GLCM), на основе которой вычисляются признаки Харалика, по умолчанию строится для какого-то конкретного направления (например, горизонтального).

Список литературы

1. Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I. «Textural features for image classification». IEEE Trans Syst Man Cybern. Vol. 3. No. 6. Pp. 610-621. 1973.
2. Mhangara P., Odindi J. (2013). Potential of texture-based classification in urban landscapes using multispectral aerial photos. South African Journal of Science. 109. 8. 10.1590/sajs.2013/1273.
3. Fedorovskiy O.D., Khyzhniak A.V., Filimonov V.Yu. Justification of the dual-use of aerospace geomonitoring of the offshore shelf: Exploration of hydrocarbon deposits and «highlighting» the marine situation. Space Sci. & Technol. 2021. 27;(2):38-44.
4. Лоссов К.К., Малинников В.А. Верификация методики обнаружения явления апвеллинга на морской поверхности по материалам космических съемок с использованием признаков Харалика // Мониторинг. Наука и технологии. 2026. №1 (67).
5. Лоссов К.К., Малинников В.А. Разработка методики использования признаков Харалика для детектирования зон апвеллинга на морской поверхности по материалам космических съемок // Мониторинг. Наука и технологии. 2025. №4 (66).
6. Chehade N., Boureau J.-G., Vidal C., Zerubia J. (2009). Multi-class SVM for forestry classification. 1673-1676.
7. J.J. J., Kumar T., Koliwad S. (2012). Comparative Analysis of Image Fusion Techniques in Remote Sensing. Communications in Computer and Information Science. 322. 111-117.

Значения всех 14 текстурных признаков Харалика будут зависеть от поворота изображения. В практическом применении для устранения зависимости текстурные признаки необходимо усреднить по всем направлениям. Данный подход реализуется в большинстве программных библиотек.

3.1.1. Группа контраста

Признак f_2 очень чувствителен к вращению из-за направленного характера вычислений; f_5 также является направленной мерой [32].

3.1.2. Группа упорядоченности:

Признак f_1 является направленным признаком, зависит от распределения в GLCM; f_9 чувствительна к вращению, значение меняется для разных углов [33].

3.2.3. Группа статистики и корреляции:

Признак f_3 является направленным признаком, измеряющим линейную зависимость в заданном направлении; f_6, f_7, f_{10} анализируют распределение сумм яркостей для выбранного направления; $f_4, f_8, f_{11} - f_{14}$ основаны на GLCM для конкретного направления [34].

2.16. Ротационная инвариантность (после усреднения) на практике

Для обеспечения ротационной инвариантности на практике усредняют значения, полученные для 4 основных направлений ($0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ$) [13,28]. Эта процедура применима ко всем статистическим показателям: после усреднения все 14 признаков становятся ротационно-инвариантными.

Вывод

В статье сформулированы теоретические основы применения текстурных признаков Харалика для тематического дешифрирования аэрокосмических изображений. В данном исследовании каждый из 14 текстурных признаков был охарактеризован по 14 ключевым параметрам и 2 дополнительными параметрами, общими для всех признаков. Свойства признаков Харалика были систематизированы в виде сводных таблиц, а также списков по каждому признаку Харалика или их обобщенной группе. Данная статья может явиться практическим руководством по выбору наиболее подходящих признаков.

8. Umaselvi M., Kumar S. & Athithya M. (2012). Color Based Urban and Agricultural Land Classification by GLCM Texture Features. IET Chennai 3rd International on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2012). Tiruchengode. 2012. Pp. 1-4.
9. Rees W.G., Lin I.-I. Texture-based classification of cloud and ice-cap surface features. *Annals of Glaciology*. No. 17. Pp. 250-254. 1993.
10. Adhikari A., Garg R.D., Pundir S.K., Singhal A. Delineation of agricultural fields in arid regions from Worldview-2 datasets based on image textural properties. *Environ Monit Assess*. 2023 Apr 24;195(5):605.
11. Parikesit S.O., Muhamad D., Harashina K., Takeuchi K., & Umezaki M. (2010). Land use/cover classification of a complex agricultural landscape using single-dated very high spatial resolution satellite-sensed imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(6). 722-736.
12. Löfstedt T., Brynolfsson P., Askund T., Nyholm T., Garpebring A. (2019). Gray-level invariant Haralick texture features. *PLOS ONE*. 14.
13. Oprisan S.A., Oprisan A. Scaling laws for Haralick texture features of linear gradients. *PeerJ Comput Sci*. 2025 Apr 30;11:e2856.
14. Oprisan A, Oprisan SA. Scaling of Haralick features with image bit depth and gray level co-occurrence matrix displacement vector for linear gradients. *Comput Biol Med*. 2025 Sep;196(Pt C):110880.
15. Saladin A.M., Jiao L., Zhang X. «GPU-accelerated computation for texture features using OpenCL framework». 2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics. Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). Nakhon Ratchasima. Thailand. 2014. Pp. 1-6.
16. Hong H., Zheng L., Pan S. (2018). Computation of Gray Level Co-occurrence Matrix Based on CUDA and Optimization for Medical Computer Vision Application. *IEEE Access*.
17. Hall-Beyer M. (2017). Practical guidelines for choosing GLCM textures to use in landscape classification tasks over a range of moderate spatial scales. *International Journal of Remote Sensing*. 38(5). 1312-1338.
18. Wang H., Zhao Y., Pu R., Zhang Z. Mapping Robinia Pseudoacacia Forest Health Conditions by Using Combined Spectral, Spatial, and Textural Information Extracted from IKONOS Imagery and Random Forest Classifier. *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. No. 7. Pp. 9020-9044.
19. Дмитриев Е.В., Зотов С.А., Мельник П.Г. Определение состава смешанных древостоев на основе спектрально-текстурной классификации спутниковых изображений высокого разрешения // *Resour. Technol*. 2020. №4.
20. Родионова Н.В. (2014). Текстурная RGB – сегментация одноканальных TerraSAR-X изображений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 11(1). С. 301-307.
21. Rodionova N.V. (2016). Evaluation of Sentinel 1 imagery for burned area detection in southern Siberia in spring and summer 2015. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*.
22. Nguemhe Fils S.C., Bekele Mongo C.H., Nkouathio D.G., Mimba M.E., Etouna J., Nouck P.N., Nyeck B. Radarsat-1 image processing for regional-scale geological mapping with mining vocation under dense vegetation and equatorial climate environment, Southwestern Cameroon. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. Volume 21. Supplement 1. 2018. Pages S43-S54.
23. Зотов С.А., Дмитриев Е.В., Мельник П.Г., Кондранин Т.В. Повышение информативности мультиспектральных спутниковых изображений с использованием данных текстурного анализа // *Известия ВУЗов. Лесной журнал*. 2022. №2.
24. Balling J., Herold M., Reiche J. How textural features can improve SAR-based tropical forest disturbance mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Volume 124. 2023.
25. Fedorovskiy O., Sedlerova O., Khyzhniak A. (2023). Improvement of the Information Technology Basis for Aerospace Monitoring of the Sea Shelf for the Search for Hydrocarbon Deposits in the Optical Spectral Range. In: Urbach H.P., Jiang H. (eds) *Proceedings of the 7th International Symposium of Space Optical Instruments and Applications*. ISSOIA 2022. Springer Proceedings in Physics. Vol 295. Springer. Singapore.
26. Zhou J., Guo R., Sun M., Di T., Wang S., Zhai J., Zhao Z. (2017). The Effects of GLCM parameters on LAI estimation using texture values from Quickbird Satellite Imagery. *Scientific Reports*.
27. Donnini J. Remote Sensing of Forest Composition and Diversity: Assessing Spectral Predictors and Long-Term Changes in Quebec's Forests: Masters thesis. J. Donnini; Concordia University. Montreal. 2025.
28. Boland Michael V., Quantitative Description and Automated Classification of Cellular Protein Localization Patterns in Fluorescence Microscope Images of Mammalian Cells : A Dissertation Submitted to the Graduate School in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Bioengineering Boland Michael V.: defended on 07.1999; Pittsburgh. PA. USA. Pittsburgh. 1999.
29. Calvacanti G.G.B. de O. et al. Comparing the Use of Sum and Difference Histograms and Gray Levels Occurrence Matrix for Texture Descriptors. 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). Rio de Janeiro. Brazil: IEEE. 2018. Pp. 1-8.
30. Brynolfsson P., Nilsson D., Torheim T., et al. Haralick texture features from apparent diffusion coefficient (ADC) MRI images depend on imaging and pre-processing parameters. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. article id 4041.
31. Plate A., et al. Towards guidelines to harmonize textural features in PET: Haralick textural features vary with image noise, but exposure-invariant domains enable comparable PET radiomics. *PLOS ONE*. 2020.
32. Weibel J., Gola J., Britz D., Mücklich F., A new analysis approach based on Haralick texture features for the characterization of microstructure on the example of low-alloy steels. *Materials Characterization*. Volume 144. 2018. Pages 584-596, ISSN 1044-5803.
33. Oprisan A., Oprisan SA. (2023) Bounds for Haralick features in synthetic images with sinusoidal gradients. *Front. Sig. Proc*. 3:1271769.
34. Zubair A.R.A. Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM) Based Second Order Statistics for Image Texture Analysis. A.R.A. Zubair O.A. Alo. October 2019.

References

1. Haralick R.M., Shanmugam K., Denstien I. «Textural features for image classification». *IEEE Trans Syst Man Cybern*. Vol. 3. No. 6. Pp. 610-621. 1973.
2. Mhangara P., Odindi J. (2013). Potential of texture-based classification in urban landscapes using multispectral aerial photos. *South African Journal of Science*. 109. 8. 10.1590/sajs.2013/1273.
3. Fedorovskiy O.D., Khyzhniak A.V., Filimonov V.Yu. Justification of the dual-use of aerospace geomonitoring of the offshore shelf: Exploration of hydrocarbon deposits and «highlighting» the marine situation. *Space Sci. & Technol*. 2021. 27;(2):38-44.

4. Lossov K.K., Malinnikov V.A. Verification of the methodology for detecting upwelling phenomena on the ocean surface based on satellite imagery using Haralick features. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2026. No. 1 (67).
5. Lossov K.K., Malinnikov V.A. Development of a methodology for using Haralick features to detect upwelling zones on the ocean surface based on satellite imagery. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2025. No. 4 (66).
6. Chehade N., Boureau J.-G., Vidal C., Zerubia J. (2009). Multi-class SVM for forestry classification. 1673-1676.
7. J.J. J., Kumar T., Koliwad S. (2012). Comparative Analysis of Image Fusion Techniques in Remote Sensing. *Communications in Computer and Information Science*. 322. 111-117.
8. Umaselvi M., Kumar S. & Athithya M. (2012). Color Based Urban and Agricultural Land Classification by GLCM Texture Features. IET Chennai 3rd International on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2012). Tiruchengode. 2012. Pp. 1-4.
9. Rees W.G., Lin I.-I. Texture-based classification of cloud and ice-cap surface features. *Annals of Glaciology*. No. 17. Pp. 250-254. 1993.
10. Adhikari A., Garg R.D., Pundir S.K., Singhal A. Delineation of agricultural fields in arid regions from Worldview-2 datasets based on image textural properties. *Environ Monit Assess*. 2023 Apr 24;195(5):605.
11. Parikesit S.O., Muhamad D., Harashina K., Takeuchi K., & Umezaki M. (2010). Land use/cover classification of a complex agricultural landscape using single-dated very high spatial resolution satellite-sensed imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36(6). 722-736.
12. Löfstedt T., Brynolfsson P., Asklund T., Nyholm T., Garpebring A. (2019). Gray-level invariant Haralick texture features. *PLOS ONE*. 14.
13. Oprisan S.A., Oprisan A. Scaling laws for Haralick texture features of linear gradients. *PeerJ Comput Sci*. 2025 Apr 30;11:e2856.
14. Oprisan A., Oprisan S.A. Scaling of Haralick features with image bit depth and gray level co-occurrence matrix displacement vector for linear gradients. *Comput Biol Med*. 2025 Sep;196(Pt C):110880.
15. Saladin A.M., Jiao L., Zhang X. «GPU-accelerated computation for texture features using OpenCL framework». 2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics. Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). Nakhon Ratchasima. Thailand. 2014. Pp. 1-6.
16. Hong H., Zheng L., Pan S. (2018). Computation of Gray Level Co-occurrence Matrix Based on CUDA and Optimization for Medical Computer Vision Application. *IEEE Access*.
17. Hall-Beyer M. (2017). Practical guidelines for choosing GLCM textures to use in landscape classification tasks over a range of moderate spatial scales. *International Journal of Remote Sensing*. 38(5). 1312-1338.
18. Wang H., Zhao Y., Pu R., Zhang Z. Mapping Robinia Pseudoacacia Forest Health Conditions by Using Combined Spectral, Spatial, and Textural Information Extracted from IKONOS Imagery and Random Forest Classifier. *Remote Sensing*. 2015. Vol. 7. No. 7. Pp. 9020-9044.
19. Dmitriev E.V., Zotov S.A., Melnik P.G. Determination of the composition of mixed stands based on spectral-textural classification of high-resolution satellite images. *Resour. Technol*. 2020. No. 4.
20. Rodionova N.V. (2014). Textured RGB segmentation of single-channel TerraSAR-X images. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 11(1). Pp. 301-307.
21. Rodionova N.V. (2016). Evaluation of Sentinel 1 imagery for burned area detection in southern Siberia in spring and summer 2015. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*.
22. Nguemhe Fils S.C., Bekele Mongo C.H., Nkouathio D.G., Mimba M.E., Etouna J., Nouck P.N., Nyeck B. Radarsat-1 image processing for regional-scale geological mapping with mining vocation under dense vegetation and equatorial climate environment, Southwestern Cameroon. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. Volume 21. Supplement 1. 2018. Pages S43-S54.
23. Zotov S.A., Dmitriev E.V., Melnik P.G., Kondranin T.V. Increasing the informative value of multispectral satellite images using textural analysis data. *Izvestiya VUZov. Lesnoy zhurnal*. 2022. No. 2.
24. Balling J., Herold M., Reiche J. How textural features can improve SAR-based tropical forest disturbance mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Volume 124. 2023.
25. Fedorovskiy O., Sedlerova O., Khyzhniak A. (2023). Improvement of the Information Technology Basis for Aerospace Monitoring of the Sea Shelf for the Search for Hydrocarbon Deposits in the Optical Spectral Range. In: Urbach H.P., Jiang H. (eds) *Proceedings of the 7th International Symposium of Space Optical Instruments and Applications*. ISSOIA 2022. Springer Proceedings in Physics. Vol 295. Springer. Singapore.
26. Zhou J., Guo R., Sun M., Di T., Wang S., Zhai J., Zhao Z. (2017). The Effects of GLCM parameters on LAI estimation using texture values from Quickbird Satellite Imagery. *Scientific Reports*.
27. Donnini J. Remote Sensing of Forest Composition and Diversity: Assessing Spectral Predictors and Long-Term Changes in Quebec's Forests: Masters thesis. J. Donnini; Concordia University. Montreal. 2025.
28. Boland Michael V., Quantitative Description and Automated Classification of Cellular Protein Localization Patterns in Fluorescence Microscope Images of Mammalian Cells : A Dissertation Submitted to the Graduate School in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Bioengineering Boland Michael V.: defended on 07.1999; Pittsburgh. PA. USA. Pittsburgh. 1999.
29. Cavalcanti G.G.B. de O. et al. Comparing the Use of Sum and Difference Histograms and Gray Levels Occurrence Matrix for Texture Descriptors. 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). Rio de Janeiro. Brazil: IEEE. 2018. Pp. 1-8.
30. Brynolfsson P., Nilsson D., Torheim T., et al. Haralick texture features from apparent diffusion coefficient (ADC) MRI images depend on imaging and pre-processing parameters. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. article id 4041.
31. Plate A., et al. Towards guidelines to harmonize textural features in PET: Haralick textural features vary with image noise, but exposure-invariant domains enable comparable PET radiomics. *PLOS ONE*. 2020.
32. Webel J., Gola J., Britz D., Mücklich F., A new analysis approach based on Haralick texture features for the characterization of microstructure on the example of low-alloy steels. *Materials Characterization*. Volume 144. 2018. Pages 584-596, ISSN 1044-5803.
33. Oprisan A., Oprisan S.A. (2023) Bounds for Haralick features in synthetic images with sinusoidal gradients. *Front. Sig. Proc*. 3:1271769.
34. Zubair A.R.A. Grey Level Co-occurrence Matrix (GLCM) Based Second Order Statistics for Image Texture Analysis. A.R.A. Zubair O.A. Alo. October 2019.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Коробкова Екатерина Ивановна

аспирант, преподаватель кафедры космического мониторинга и экологии, Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия

Information about authors
Affiliations

Korobkova Ekaterina Ivanovna

Graduate Student, Lecturer of the Department of Space Monitoring and Ecology, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 23.06.2026 г.

СРАВНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ПРИ КЛАССИФИКАЦИИ НАЗЕМНОГО ПОКРОВА И МОНИТОРИНГЕ ГОРОДСКИХ ЗЕЛЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ (НА ПРИМЕРЕ ТХЮЙНГУЕНА, Г. ХАЙФОН, ВЬЕТНАМ)

Фам Данг Хиен

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

e-mail: lopmaybay@mail.ru

Городские зеленые пространства выполняют важные средообразующие функции, однако в быстро урбанизирующихся районах стремительно сокращаются, что требует регулярного и объективного контроля средствами космической съемки. В работе на облачной платформе Google Earth Engine выполнено картографирование наземного покрова муниципального образования Тхюйнгунен – формируемого административного центра города Хайфон (Вьетнам) – за 2017-2025 гг., а также сопоставлена точность классификации при разных источниках входных данных. Один и тот же классификатор – случайный лес (Random Forest) – обучался на идентичной выборке, но с различными наборами признаков: спектральные каналы, спектральные индексы, статистики за год, главные компоненты, а также готовые эмбединги AlphaEarth; сравнивались снимки Sentinel-2 (10 м), Landsat 8/9 (30 м) и эмбединги AlphaEarth (10 м). Наилучший результат получен для Sentinel-2 с расширенным набором из 43 признаков – общая точность 98.6%, каппа 0.976; эмбединги AlphaEarth (64 канала) дали 97.1% без ручного конструирования признаков, тогда как для Landsat из-за более грубого разрешения точность не превысила 92%. По картам 2017-2025 гг. доля зелено-водных пространств снизилась с 73.3 до 52.6%, застроенные территории выросли примерно на 733 га. Пиксельная регрессия NDVI по восьми парам лет показала наибольшее сокращение растительности в 2017-2018 и 2023-2024 гг. Сопоставление трендов NDVI с ходом освоения территории и погодными событиями позволило выделить характерные этапы трансформации, связанные со строительством нового административного центра и индустриального парка VSIP, ограничениями периода COVID-19 и последствиями супертайфуна «Яги» и последовавшего лесного пожара (2024 г.). Предложенная схема воспроизводима и применима для оперативного мониторинга на муниципальном уровне.

Ключевые слова: дистанционное зондирование; классификация наземного покрова; случайный лес; Sentinel-2; Landsat; AlphaEarth; NDVI; городские зелёные пространства; Google Earth Engine; Тхюйнгунен.

COMPARISON OF SATELLITE DATA SOURCES FOR LAND-COVER CLASSIFICATION AND MONITORING OF URBAN GREEN SPACES: A CASE STUDY OF THUY NGUYEN, HAI PHONG CITY, VIETNAM

Pham Dang Hien

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

Urban green spaces provide vital environmental services but shrink rapidly under urbanization, which calls for regular and objective satellite-based monitoring. Using Google Earth Engine, we mapped land cover of the Thuy Nguyen municipality – the emerging administrative centre of Hai Phong, Vietnam – for 2017-2025 and compared classification accuracy across different input data. The same Random Forest classifier was trained on an identical sample but with various feature sets – spectral bands, spectral indices, annual statistics, principal components and ready-made AlphaEarth embeddings – for Sentinel-2 (10 m), Landsat 8/9 (30 m) and AlphaEarth (10 m). The best result was obtained for Sentinel-2 with an extended 43-feature set (overall accuracy 98.6%, kappa 0.976); the 64-band AlphaEarth embedding reached 97.1% without manual feature engineering, whereas the coarser Landsat data did not exceed 92%. Over 2017-2025 the share of green-and-water surfaces fell from 73.3% to 52.6%, and built-up land grew by about 733 ha. Per-pixel NDVI regression over eight year-pairs identified 2017-2018 and 2023-2024 as periods of the greatest vegetation loss. Comparison of the NDVI trends with land development and weather events revealed distinct transformation stages linked to construction of the new administrative centre and the VSIP industrial park, COVID-19 restrictions and the impact of super typhoon Yagi and a subsequent forest fire (2024). The proposed workflow is reproducible and suitable for operational municipal-scale monitoring.

Keywords: remote sensing; land-cover classification; random forest; Sentinel-2; Landsat; AlphaEarth; NDVI; urban green spaces; Google Earth Engine; Thuy Nguyen.

Введение

Зеленые насаждения и водные объекты формируют средообразующий каркас города: они сглаживают температурный режим приземного слоя, задерживают сток, служат местами обитания и определяют комфортность городской среды. При интенсивном строительстве проницаемые поверхности сменяются непроницаемыми, и перечис-

ленные функции ослабевают [1]. В периферийных районах крупных городов такие изменения идут особенно быстро и неравномерно, поэтому данные официального учета запаздывают, а космическая съемка становится основным источником объективной и сопоставимой во времени информации [2].

Развитие облачных вычислений заметно упростило подобные исследования. Платформа Google

Earth Engine предоставляет прямой доступ к многолетним архивам и позволяет обрабатывать их совместно с алгоритмами машинного обучения без загрузки снимков на компьютер пользователя [3]; российский опыт эксплуатации систем архивации и анализа спутниковых данных подтверждает практическую ценность такого подхода для мониторинга растительного покрова [4,5]. Для наблюдения за городской растительностью обычно применяют снимки Sentinel-2 с разрешением 10-20 м [6] и вегетационные индексы, прежде всего NDVI [7,8]. В последние годы к традиционным спектральным признакам добавились обучаемые представления: модель AlphaEarth кодирует каждый пиксель 64-мерным вектором, устойчивым к облачности и различиям освещенности [9].

При таком разнообразии источников возникает прикладной вопрос: какие именно входные данные обеспечивают наилучшую классификацию наземного покрова на конкретной территории и насколько выигрыш оправдывает усложнение обработки. Систематических сопоставлений для условий быстро растущих вьетнамских городов пока немного. Мы выбрали в качестве полигона Тхюйнгунен – территорию, где 1 января 2025 г. на месте одноименного уезда образован город в составе Хайфона, а с 1 июля 2025 г. сформирован новый район (фьонг) Тхюйнгунен; здесь создается новый административно-политический центр Хайфона, что сопровождается масштабным строительством. Цель работы – сопоставить точность классификации наземного покрова при разных источниках спутниковых данных (Sentinel-2, Landsat 8/9, AlphaEarth) и наборах признаков, а затем на выбранной схеме оценить дина-

мику зеленых пространств за 2017-2025 гг. и тренды NDVI.

Материалы и методы

Район исследования. Тхюйнгунен расположен в северной части Хайфона, на левом берегу р. Кам, и представляет собой мозаику жилой и промышленной застройки, сельскохозяйственных угодий, рек и прудов аквакультуры. Площадь анализируемого контура составляет около 35.5 км² (≈3545.5 га по результатам классификации). Единый контур границы применялся ко всем годам ряда, поэтому изменения площадей отражают динамику покрова, а не границ (рис. 1). Общая последовательность обработки спутниковых данных и анализа приведена на рис. 2.

Исходные данные. Использованы три источника (табл. 1): снимки Sentinel-2 уровня поверхностного отражения с маскированием облачности по Cloud Score+ [10]; снимки Landsat 8/9 (Collection 2, уровень 2); годовые эмбединги AlphaEarth (64 канала). Для контроля и подбора эталонов привлекались базовые слои Google Satellite и разновременные снимки Google Earth. Все расчеты выполнены в Google Earth Engine.

Классификация. Наземный покров разделен на три класса – водные объекты, растительность и застройка и открытый грунт. При анализе динамики первые два класса объединялись в показатель зелено-водных пространств как проницаемые поверхности с близкими средообразующими функциями [1], но их площади приводятся и по отдельности. Классификатор – случайный лес (Random Forest) из 100 деревьев [11,12]. Эталонные отбирались стратифицированно по трем классам с визуальной проверкой на снимках высокого разрешения; обучающая выборка

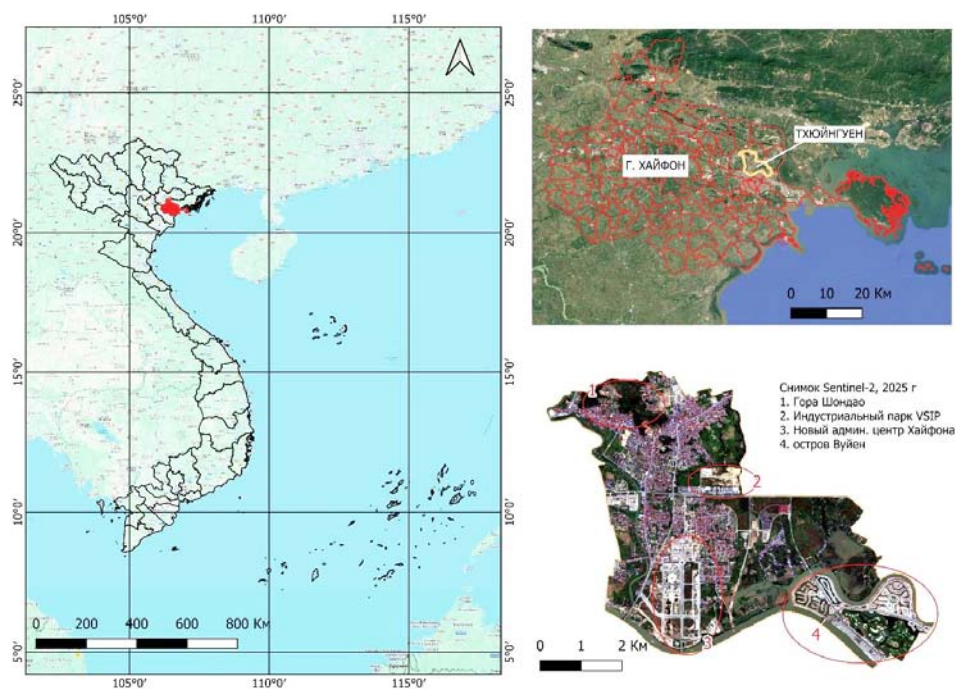


Рис. 1. Местоположение и границы района исследования (Тхюйнгунен, г. Хайфон)



Рис. 2. Общая методическая схема исследования (обработка спутниковых данных в Google Earth Engine)

Таблица 1

Использованные спутниковые данные

Набор данных	Поставщик	Разрешение	Период	Роль в работе
Sentinel-2 SR Harmonized	ESA/Copernicus	10-20 м	2017-2025	Классификация, NDVI
Landsat 8/9 (C2 L2)	USGS	30 м	2024	Сравнение источников
AlphaEarth Satellite Embedding	Google DeepMind	10 м	2017-2025	Классификация (осн. карты)
Cloud Score+	Google	10 м	2017-2025	Маска облаков и теней
Google Satellite / Earth	Google	—	разные даты	Контроль, отбор эталонов

насчитывала около 1760 точек (70% от набора в 2520 точек с распределением по классам 711/402/1407), а для независимого контроля использовался отдельный набор из 6486 точек (для Landsat из-за огрубления до 30 м – 720 точек) (см. рис. 3).

Сравнение источников данных. Чтобы оценить влияние входных данных, один и тот же алгоритм (случайный лес, 100 деревьев) и одну и ту же обучающую/контрольную выборку применяли к разным

наборам признаков. Для Sentinel-2 рассматривались: четыре канала (синий, зеленый, красный, ближний ИК); шесть каналов (с добавлением двух каналов SWIR); те же четыре канала совместно с NDVI; три индекса (NDVI, NDWI, NDBI); расширенный набор из 43 признаков (спектральные каналы и «красный край», индексы, годовые максимумы и минимумы, а также первые главные компоненты); наборы из первых трех и четырех главных компонент.



Рис. 3. Схема размещения наборов точек для обучения (левый) и оценки точности (правый)

Для Landsat 8/9 испытаны сопоставимые наборы (4 и 6 каналов, три индекса, главные компоненты, расширенный набор из 31 признака). Для AlphaEarth использованы полный 64-мерный эмбединг, его усечение до 17 каналов и шесть главных компонент. Точность каждого варианта оценивалась по контрольной выборке.

Спектральные индексы вычислялись как нормализованные разности отражательной способности ρ в соответствующих каналах: NDVI [8] – формула (1); NDWI для выделения воды [13] – (2); NDBI для застройки [14] – (3):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (1)$$

$$NDWI = \frac{\rho_{Green} - \rho_{NIR}}{\rho_{Green} + \rho_{NIR}} \quad (2)$$

$$NDBI = \frac{\rho_{SWIR1} - \rho_{NIR}}{\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}} \quad (3)$$

где ρ_{NIR} , ρ_{Red} , ρ_{Green} , ρ_{SWIR1} – отражательная способность в ближнем инфракрасном, красном, зеленом и коротковолновом инфракрасном (SWIR1) каналах соответственно. Точность оценивалась по матрице ошибок: общая точность OA как доля верно классифицированных объектов (4) и коэффициент кап-па Козна с поправкой на случайное совпадение (5) [15,16]:

$$OA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k n_{ii} \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} \quad (5)$$

где n_{ii} – число верно отнесенных объектов класса i (диагональ матрицы ошибок), k – число классов, N – общий объем контрольной выборки, p_o – наблюдаемая доля совпадений (равная OA), p_e – ожидаемая при случайном отнесении доля совпадений. Дополнительно для каждого класса рассчитывались точность производителя (PA) и точность пользователя (UA).

Регрессия NDVI. Тренды растительности оценивались по методу наименьших квадратов: для каждого пикселя коэффициент наклона a линейной зависимости NDVI от времени рассчитывался по всем безоблачным снимкам Sentinel-2 внутри рассматриваемого интервала, а не по двум крайним датам. Для ряда из n наблюдений $(t_i, NDVI_i)$, где t_i – момент съемки в долях года, коэффициенты определялись по (6), а согласованность модели – коэффициентом детерминации R^2 (7):

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i NDVI_i - (\sum_{i=1}^n t_i)(\sum_{i=1}^n NDVI_i)}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (NDVI_i - at_i - b)^2}{\sum_{i=1}^n (NDVI_i - \mu)^2} \quad (7)$$

здесь b – свободный член, μ – среднее NDVI ряда, $at_i + b$ – модельное значение. Поскольку время выражено в годах, a имеет размерность NDVI/год. Знак и величина a использовались для градации трендов по пяти уровням с учетом знака a (сильное и умеренное снижение, стабильно, умеренный и сильный рост): $|a| \leq 0.1$ – стабильно; $0.1 < |a| \leq 0.2$ – умеренное изменение; $|a| > 0.2$ – сильное изменение. Пороги 0.1 и 0.2 подобраны эмпирически по распределению годовых изменений NDVI на территории и применимы к анализу по смежным парам лет; для многолетних интервалов величина наклона закономерно сглаживается и пороги требуют пересмотра [17]. Выбор линейной регрессии (МНК) обусловлен ее устойчивостью к сезонным колебаниям при достаточно равномерном распределении наблюдений и наглядной интерпретируемостью долговременных тенденций «озеленения – деградации»; такой подход широко применяется при анализе многолетних рядов NDVI [18,19] и поддержан штатными средствами построения линейных трендов Google Earth Engine. Для контроля устойчивости оценок в инструменте предусмотрен также робастный вариант – оценка наклона по методу Тейла-Сена с проверкой значимости по критерию Манна-Кендалла.

Доступность кода. Все вычисления выполнены в облачной среде Google Earth Engine; исходный код обработки (классификация и регрессия NDVI) доступен по ссылке: <https://code.earthengine.google.com/095cb0d90397cba2a752f9d2bbc8421c>.

Результаты и обсуждение

Сравнение источников данных. Результаты 16 вариантов классификации сведены в табл. 2 и на рис. 4. Наиболее точным оказался Sentinel-2 с расширенным набором из 43 признаков: общая точность 98.6%, каппа 0.976. Близкий результат дали эмбединги AlphaEarth (64 канала) – 97.1% при каппа 0.951, причем без ручного конструирования признаков, что подтверждает высокую информативность обучаемого представления. Показательно, что даже минимальный набор Sentinel-2 из четырех спектральных каналов обеспечил 97.4%: на разрешении 10 м спектральной информации уже достаточно для устойчивого разделения трех классов, а добавление NDVI к этим каналам практически не изменило результат (96.9%). Снижение размерности сказывалось заметнее: три индекса (NDVI, NDWI, NDBI) дали лишь 93.8%, а усечение эмбединга до 17 каналов – 88.5%.

Наиболее наглядно проявилась роль

пространственного разрешения. Все варианты Landsat 8/9 (30 м) уложились в диапазон 87-92% и уступили десятиметровым данным при сопоставимых наборах признаков: лучший результат Landsat – 91.9% (31 признак) – оказался ниже худшего варианта полноразмерного Sentinel-2. Причина понятна: при 30-метровом пикселе мелкие сады, узкие полосы застройки и небольшие водоемы попадают в смешанные пиксели, что особенно снижает полноту распознавания растительности. Практический вывод для рассматриваемого масштаба таков: связка «10-метровые данные + умеренно богатый набор признаков» предпочтительнее наращивания числа признаков на грубом разрешении, а готовые эмбединги AlphaEarth дают конкурентную точность при минимуме подготовительной работы. Чтобы оценить, какие различия в точности статистически

значимы, для общей точности рассчитаны 95%-е доверительные интервалы по методу Уилсона [16,20]. При объеме контрольной выборки 6486 точек интервалы узкие (порядка ± 0.3 – 0.4%): набор из 43 признаков Sentinel-2 (98.6%) значительно превосходит остальные схемы, тогда как эмбединги AlphaEarth (64 канала, 97.1%) статистически неотличимы от компактных наборов Sentinel-2 (четыре–шесть каналов, 97.3–97.4%) – их интервалы перекрываются. Лучший же вариант Landsat (91.9% при $n=720$, $\pm 2.0\%$) отделен от всех десятиметровых схем с большим запасом, что статистически подтверждает значимость эффекта пространственного разрешения.

Детальная точность выбранной схемы. Для многолетнего картографирования выбраны эмбединги AlphaEarth: они дают одну из наивысших точностей (97.1%) и удобны тем, что уже согласованы

Таблица 2

Общая точность (OA) и каппа при разных источниках данных и наборах признаков (Random Forest, 100 деревьев)

Источник	Разреш., м	Набор признаков (число)	OA, %	к
Sentinel-2	10	43 признака (каналы, «кр. край», индексы, макс/мин, ГК)	98.6	0.976
Sentinel-2	10	4 канала (B, G, R, NIR)	97.4	0.955
Sentinel-2	10	6 каналов (+ SWIR1, SWIR2)	97.4	0.955
Sentinel-2	10	4 канала + NDVI	96.9	0.947
Sentinel-2	10	Главные компоненты ГК1–ГК4	96.7	0.943
Sentinel-2	10	Главные компоненты ГК1–ГК3	95.4	0.922
Sentinel-2	10	3 индекса (NDVI, NDWI, NDBI)	93.8	0.894
AlphaEarth	10	64 канала (полный эмбединг)	97.1	0.951
AlphaEarth	10	Главные компоненты ГК1–ГК6	94.7	0.912
AlphaEarth	10	17 каналов (A00–A16)	88.5	0.814
Landsat 8/9	30	31 признак (каналы, индексы, макс/мин, ГК)	91.9	0.864
Landsat 8/9	30	Главные компоненты ГК1–ГК4	90.6	0.840
Landsat 8/9	30	6 каналов	89.6	0.823
Landsat 8/9	30	4 канала (B, G, R, NIR)	88.2	0.799
Landsat 8/9	30	Главные компоненты ГК1–ГК3	87.4	0.783
Landsat 8/9	30	3 индекса (NDVI, NDWI, NDBI)	87.2	0.786

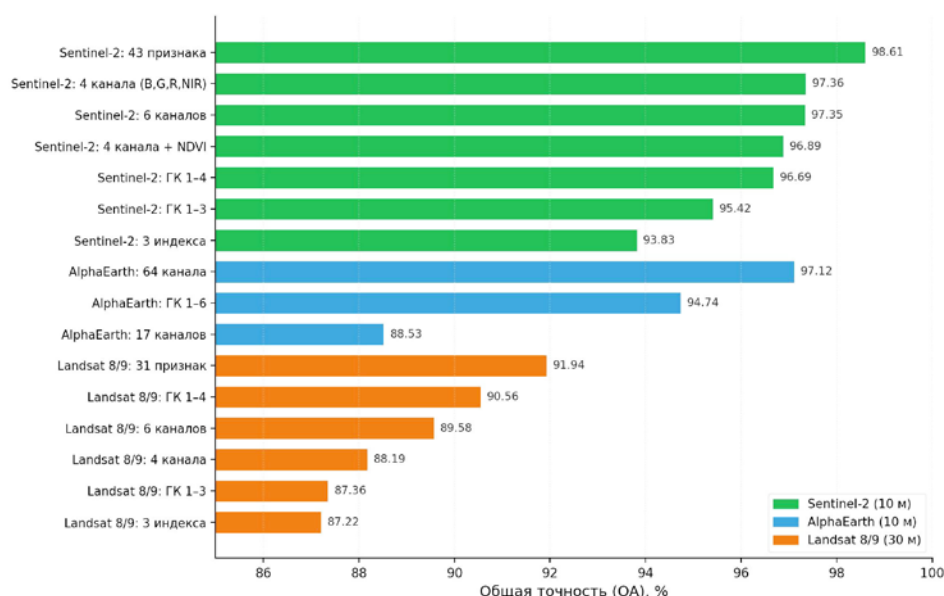


Рис. 4. Общая точность классификации при разных источниках данных и наборах признаков

между годами. Матрица ошибок этого варианта (табл. 3) показывает уверенное распознавание всех трех классов; основная доля ошибок приходится на разделение застройки и растительности. Точность пользователя составила 96.3% для воды, 94.5% для растительности и 98.6% для застройки; несколько пониженная величина у растительности объясняется сезонностью земледелия – убранные или недавно засеянные поля спектрально близки к открытому грунту. С учетом доверительных интервалов эмбединга AlphaEarth (97.1%) статистически неотличимы от компактных спектральных наборов Sentinel-2 и вместе с ними образуют верхнюю по точности группу, значительно превосходящую любой вариант Landsat. При статистически сопоставимой точности решающим становится операционное преимущество: 64-канальные эмбединги рассчитаны заранее, согласованы между годами и не требуют ежегодного подбора и конструирования признаков, что обеспечивает воспроизводимость и устойчивость

многолетнего картографирования 2017-2025 гг. Поэтому именно эта схема принята за основную.

Динамика наземного покрова, 2017-2025 гг. Ежегодные карты (табл. 4) и графики (рис. 5, 6) фиксируют устойчивое замещение зеленых и водных поверхностей застройкой. В 2017 г. растительность занимала 46.0% (1630.2 га), а вместе с водой зелено-водные пространства достигали 73.3%; к 2025 г. доля растительности снизилась до 31.7% (1123.3 га), суммарно зелено-водные пространства – до 52.6%, тогда как застройка и открытый грунт выросли с 26.7% (946.8 га) до 47.4% (1679.3 га) – примерно на 733 га. До 2021-2022 гг. растительность преобладала над застройкой, затем их соотношение сменилось на противоположное, а разрыв продолжил расти; заметные межгодовые колебания долей отчасти обусловлены сезонностью растительности и присущей ей неопределенностью распознавания. Сокращение воды с 27.3 до 21.0% указывает на продолжающееся засыпание прудов и мелких водоемов.

Таблица 3

Матрица ошибок выбранной схемы (AlphaEarth, 64 канала; Random Forest)

Факт \ Классиф.	Вода	Растит.	Застройка	РА, %
Вода	1133	7	12	98.4
Растительность	6	1630	38	97.4
Застройка и откр. грунт	37	87	3536	96.6
UA, %	96.3	94.5	98.6	–

Таблица 4

Площадь и структура классов наземного покрова, 2017–2025 гг. (AlphaEarth/Random Forest)

Год	Вода, га	Растит., га	Застр. и откр. грунт, га	Зел.+вода, %
2017	968.5 (27.3%)	1630.2 (46.0%)	946.8 (26.7%)	73.3
2018	998.3 (28.2%)	1434.5 (40.5%)	1112.7 (31.4%)	68.6
2019	912.7 (25.7%)	1386.7 (39.1%)	1246.1 (35.1%)	64.9
2020	944.5 (26.6%)	1446.6 (40.8%)	1154.5 (32.6%)	67.4
2021	922.7 (26.0%)	1408.6 (39.7%)	1214.2 (34.2%)	65.8
2022	863.4 (24.4%)	1223.0 (34.5%)	1459.1 (41.2%)	58.8
2023	847.0 (23.9%)	1139.3 (32.1%)	1559.2 (44.0%)	56.0
2024	755.6 (21.3%)	1173.1 (33.1%)	1616.9 (45.6%)	54.4
2025	743.0 (21.0%)	1123.3 (31.7%)	1679.3 (47.4%)	52.6

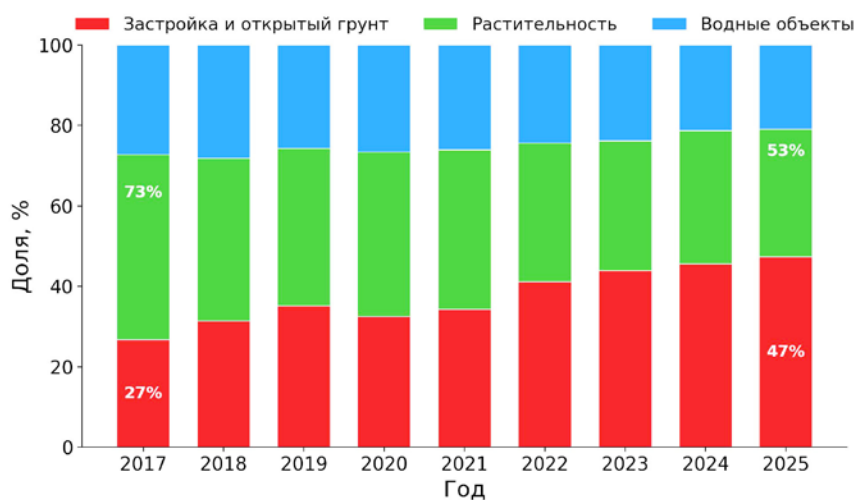


Рис. 5. Структура (в %) классов наземного покрова по годам, 2017-2025 гг.



Рис. 6. Площадь классов наземного покрова по годам, 2017-2025 гг.

Тренды NDVI. Пиксельная регрессия NDVI по восьми смежным парам лет (табл. 5, рис. 7) уточняет картину. В большинстве пар преобладают «стабильные» пиксели (2.1-2.8 тыс. га), однако площади снижения заметно колеблются. Наибольшие потери растительности пришлось на 2017-2018 гг. (сильное и умеренное снижение суммарно 668.8 га) и 2023-2024 гг. (571.2 га); последняя пара выделяется еще и минимальным приростом (лишь 201.9 га), то есть наиболее «отрицательным» балансом за весь ряд. Напротив, в 2018-2019 гг. отмечен наибольший прирост NDVI (более 1000 га умеренного и сильного

роста), что согласуется с временным восстановлением растительности и перепланировкой отдельных участков. Такая чересполосица «потеря – восстановление» типична для активно застраиваемой периферии, где расчистка площадок чередуется с озеленением и сельскохозяйственным оборотом.

Связь трендов с социально-экономическими и природными факторами. Сопоставление выявленной динамики NDVI с ходом хозяйственного освоения территории и погодными событиями позволяет выделить несколько характерных этапов трансформации. Наиболее интенсивная деградация

Таблица 5

Площадь (га) по градациям тренда NDVI для восьми пар лет, 2017-2025 гг.

Пара лет	Сильн. сниж. ≤ -0.2	Умер. сниж. от -0.2 до -0.1	Стабильно от -0.1 до +0.1	Умер. Рост от +0.1 до +0.2	Сильн. Рост ≥ +0.2
2017-2018	304.4	364.4	2316.9	397.6	162.1
2018-2019	212.8	195.4	2126.2	650.7	360.5
2019-2020	145.0	179.6	2809.8	324.3	86.9
2020-2021	139.4	283.1	2501.3	505.0	116.7
2021-2022	200.7	235.1	2575.8	384.3	149.6
2022-2023	177.1	224.6	2809.3	282.6	52.0
2023-2024	243.9	327.3	2772.5	165.5	36.4
2024-2025	145.0	200.8	2534.6	523.4	141.7

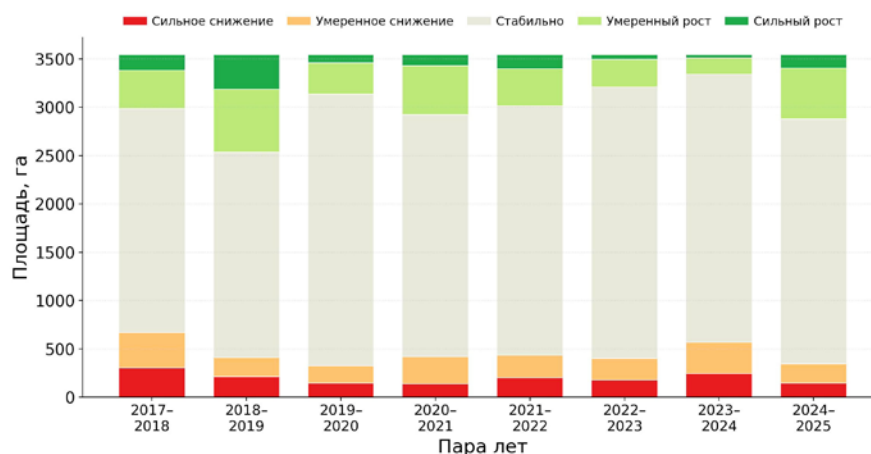


Рис. 7. Площадь по градациям тренда NDVI для 8 пар лет, 2017-2025 гг.

растительного покрова в 2017-2018 гг. (суммарное снижение 668,8 га) совпадает с началом масштабного освоения Тхюйnguена под новый административный центр Хайфона и с расширением вьетнамско-сингапурского индустриального парка VSIP, когда сельскохозяйственные угодья и пруды аквакультуры массово переводились под застройку. Последовавший в 2018-2019 гг. максимальный прирост NDVI (более 1000 га умеренного и сильного роста) отражает временное озеленение расчищенных, но еще не застроенных участков и сельскохозяйственный оборот. В 2019-2022 гг. антропогенная нагрузка колебалась; относительное замедление расчистки растительности в 2020-2021 гг. согласуется с ограничительными мерами периода пандемии COVID-19. Второй по величине спад пришелся на 2023-2024 гг. (снижение 571,2 га при минимальном приросте 201,9 га): он обусловлен главным образом ускорением градостроительного освоения – продолжением строительства административного центра и масштабной застройкой соседнего острова Вуйен, где возводится жилой комплекс «Vinhomes Royal Island» (около 870 га, официальный запуск – 2024 г.). Дополнительный вклад в конце периода могли внести последствия супертайфуна «Яги» (сентябрь 2024 г.), нанесшего значительный ущерб древесным насаждениям Хайфона (по городу в целом пострадало свыше 7 тыс. га лесов) [21]. Наконец, в 2024-2025 гг. зафиксирован заметный рост NDVI (около 665 га умеренного и сильного роста), связанный преимущественно с сельскохозяйственным оборотом и зарастанием ранее расчищенных

участков. Дополнительным локальным фактором осени 2024 г. стал лесной пожар на горе Шондао – защитном лесном массиве на северо-западе района (20 октября 2024 г.), вызванный воспламенением сухой древесной массы, накопившейся после тайфуна [22]; на фоне общего восстановления он проявляется как локальный очаг снижения NDVI на северо-западе района. Приведенные сопоставления носят интерпретационный характер и не подменяют строгого причинно-следственного анализа.

Пространственная картина изменений. Наглядное представление о происходящих процессах дает совместный просмотр трех согласованных рядов изображений – исходных снимков, карт классификации и карт трендов NDVI – за одни и те же опорные годы. На рис. 8 приведены безоблачные композиты Sentinel-2 за 2017, 2020, 2023 и 2025 гг., отражающие исходный облик территории. Соответствующие карты наземного покрова (рис. 9) показывают, как контуры застройки последовательно расширяются вдоль основных транспортных осей и постепенно вытесняют сельскохозяйственные угодья и пруды аквакультуры. Карты пространственного распределения трендов NDVI за периоды 2017-2018, 2020-2021, 2023-2024, 2024-2025 (рис. 10) локализуют участки устойчивого снижения зеленой массы: они концентрируются в зонах нового строительства, тогда как отдельные очаги роста NDVI приурочены к восстановленным или вновь озелененным участкам.

Ограничения. Класс растительности объединяет древесные насаждения, рис и огородные

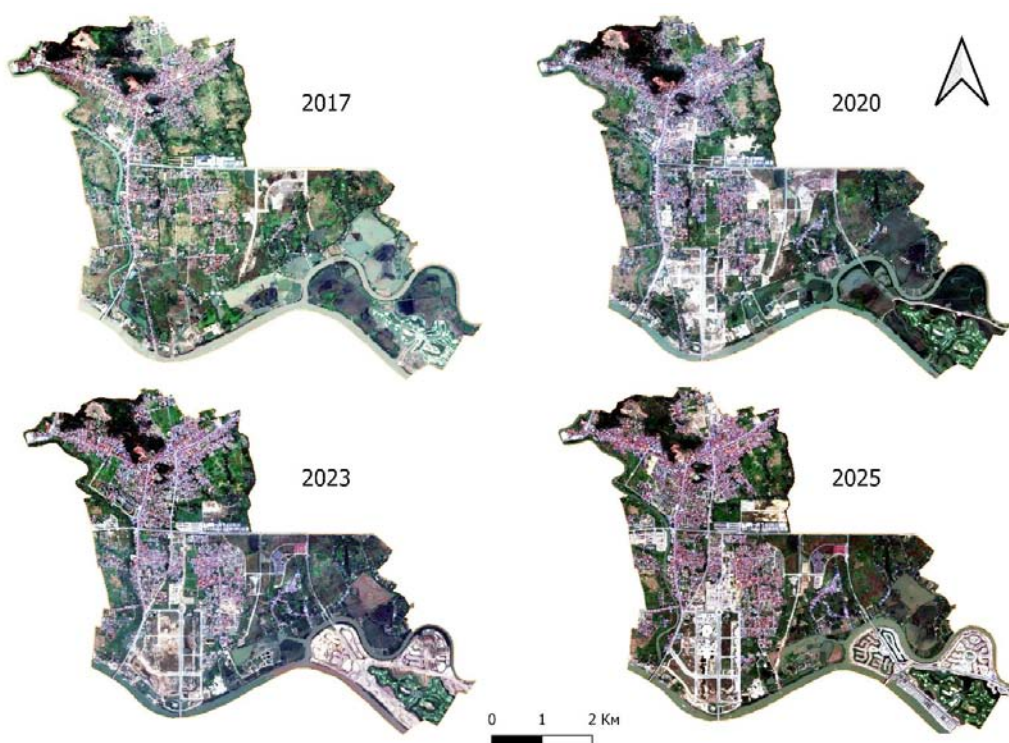


Рис. 8. Безоблачные композиты Sentinel-2 за 2017, 2020, 2023 и 2025 гг. (естественные цвета)

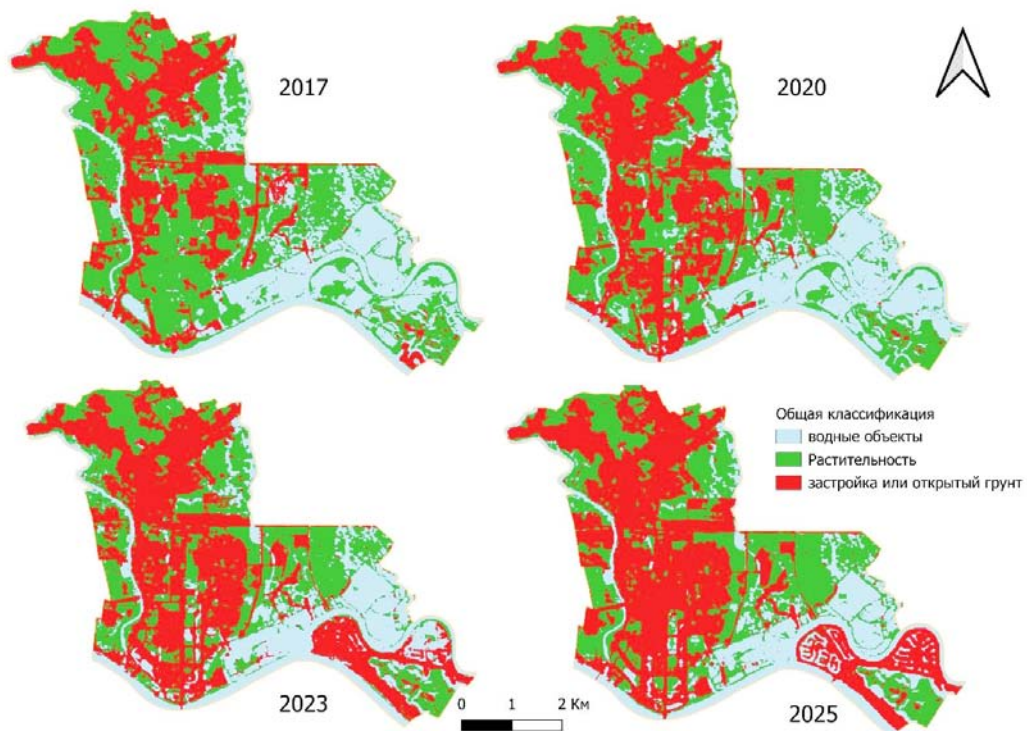


Рис. 9. Карты наземного покрова (классификация AlphaEarth/Random Forest) за 2017, 2020, 2023 и 2025 гг.

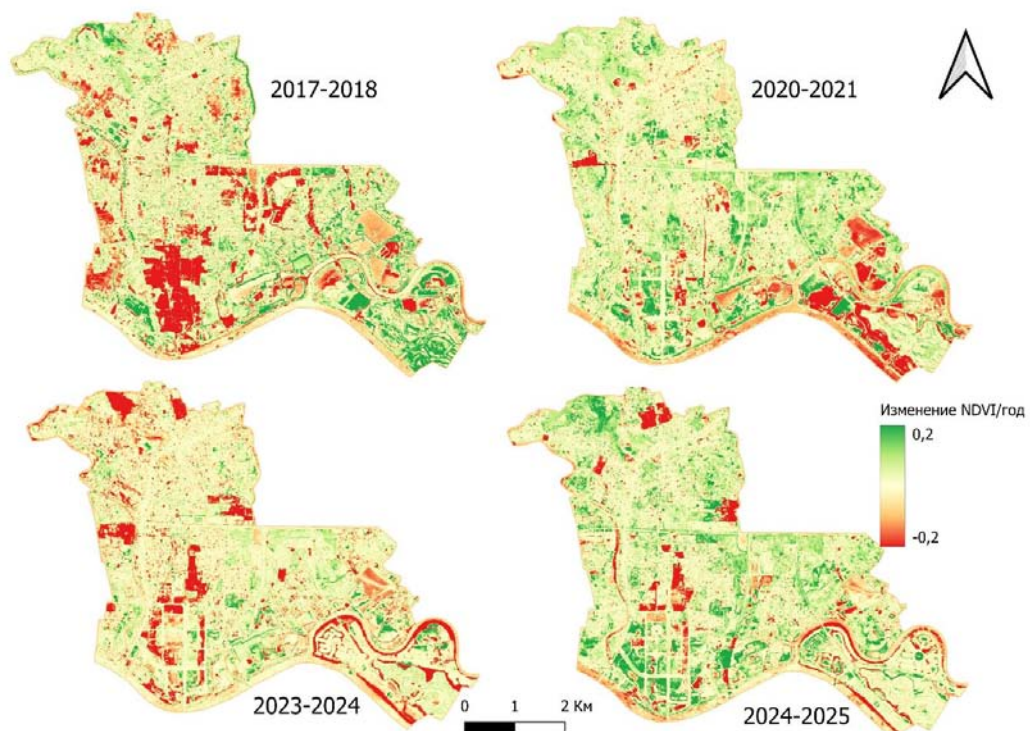


Рис. 10. Карты пространственного распределения трендов NDVI за периоды 2017-2018, 2020-2021, 2023-2024 и 2024-2025 гг.

культуры и потому чувствителен к сезону; часть открытого грунта и мутной воды смешивается с соседними классами, что вносит неопределенность в годовые оценки площадей. Оцифрованная граница может незначительно отличаться от кадастровой. Сравнение источников выполнено для одного года (2024 г.) и одной территории, поэтому количественные соотношения точности не следует переносить

на иные ландшафты без проверки. Тем не менее общий вывод о преимуществе десятиметровых данных и конкурентоспособности эмбедингов согласуется с результатами других авторов [2,9].

Выводы

Проведенное сопоставление показало, что при картографировании наземного покрова небольших, но быстро урбанизирующихся территорий

определяющим фактором точности выступает пространственное разрешение съемки, а не богатство признаков: десятиметровые данные с умеренным набором признаков предпочтительнее наращивания числа признаков на грубом разрешении. Обучаемые эмбединги AlphaEarth заслуживают отдельного внимания как практичная альтернатива ручному конструированию признаков – они дают близкую к наилучшей точность и, что особенно ценно при многолетнем мониторинге, обеспечивают межгодовую согласованность классификации.

С прикладной точки зрения работа фиксирует быстрое сокращение зелено-водного каркаса Тхюингуена в период становления нового административного центра Хайфона: проникаемые поверх-

ности последовательно уступают место застройке, причем процесс заметно ускорился после 2021 г. Совмещение ежегодной классификации с пиксельной регрессией NDVI и картами трендов позволяет оценивать итоговые потери растительности и локализовать периоды и участки наиболее интенсивных изменений – это востребовано в градостроительном контроле и планировании озеленения. Выявленные тренды согласуются с ключевыми событиями периода – освоением территории под новый административный центр и парк VSIP, застройкой соседнего острова Вуйен, пандемией COVID-19 и супертайфуном «Яги» с последовавшим лесным пожаром 2024 г., – что подтверждает чувствительность подхода к антропогенным и природным воздействиям.

Список литературы

1. Weng Q. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 117. Pp. 34-49.
2. Бартаев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН. 2016. 208 с.
3. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 202. Pp. 18-27.
4. Бартаев С.А., Лупян Е.А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10. №1. С. 197-214.
5. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. №5. С. 263-284.
6. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. et al. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 120. Pp. 25-36.
7. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // *Геоматика*. 2009. №3. С. 28-32.
8. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication*. 1974. V. 351. Pp. 309-317.
9. Brown C.F., Kazmierski M.R., Pasquarella V.J. et al. AlphaEarth Foundations: An embedding field model for accurate and efficient global mapping from sparse label data. *arXiv:2507.22291*. 2025.
10. Pasquarella V.J., Brown C.F., Czerwinski W., Rucklidge W.J. Comprehensive quality assessment of optical satellite imagery using weakly supervised video learning. *IEEE/CVF CVPR Workshops*. 2023. Pp. 2125-2135.
11. Belgiu M., Drăguț L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016. V. 114. Pp. 24-31.
12. Breiman L. Random forests. *Machine Learning*. 2001. V. 45. No. 1. Pp. 5-32.
13. McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996. V. 17. No. 7. Pp. 1425-1432.
14. Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2003. V. 24. No. 3. Pp. 583-594.
15. Cohen J. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*. 1960. V. 20. No. 1. Pp. 37-46.
16. Congalton R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. 1991. V. 37. No. 1. Pp. 35-46.
17. Терехин Э.А. Анализ сезонной динамики вегетационного индекса NDVI и отражательных свойств посевов на территории Белгородской области // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. №4. С. 244-252.
18. de Jong R., de Bruin S., de Wit A., Schaepman M.E., Dent D.L. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*. 2011. V. 115. No. 2. Pp. 692-702.
19. Fensholt R., Proud S.R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends – Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 119. Pp. 131-147.
20. Olofsson P., Foody G.M., Herold M., Stehman S.V., Woodcock C.E., Wulder M.A. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 148. Pp. 42-57.
21. Управление ООН по координации гуманитарных вопросов (УКГВ). Вьетнам: тайфун «Яги» и наводнения. Оперативная сводка № 4 (18 сентября 2024 г.). 2024. URL: <https://www.unocha.org/publications/report/viet-nam/viet-nam-typhoon-yagi-and-floods-situation-update-no-4-18-september-2024> (дата обращения: 19.08.2026).
22. Лесной пожар на горе Шондао (уезд Тхюингуен, г. Хайфон) // *Báo Hải Phòng*. 20 октября 2024 г. URL: <https://baohaiphong.vn/vi/hoat-dong-dia-phuong/chay-rung-tai-nui-son-dao-huyen-thuy-nguyen-2024920192527.htm> (дата обращения: 19.08.2026).

References

1. Weng Q. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 117. Pp. 34-49.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O. et al. *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* [Satellite mapping of the vegetation cover of Russia]. Moscow: IKI RAN. 2016. 208 p.
3. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 202. Pp. 18-27.
4. Bartalev S.A., Lupyan E.A. Research and development at the Space Research Institute of RAS on satellite methods for vegetation cover monitoring. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2013. V. 10. No. 1. Pp. 197-214.
5. Lupyan E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A. et al. Center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems of IKI RAS for environmental study and monitoring. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015. V. 12. No. 5. Pp. 263-284.
6. Drusch M., Del Bello U., Carlier S. et al. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 120. Pp. 25-36.
7. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral properties of vegetation and vegetation indices. *Geomatika*. 2009. No. 3. Pp. 28-32.
8. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication*. 1974. V. 351. Pp. 309-317.
9. Brown C.F., Kazmierski M.R., Pasquarella V.J. et al. AlphaEarth Foundations: An embedding field model for accurate and efficient global mapping from sparse label data. *arXiv:2507.22291*. 2025.
10. Pasquarella V.J., Brown C.F., Czerwinski W., Rucklidge W.J. Comprehensive quality assessment of optical satellite imagery using weakly supervised video learning. *IEEE/CVF CVPR Workshops*. 2023. Pp. 2125-2135.
11. Belgiu M., Drăguț L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016. V. 114. Pp. 24-31.
12. Breiman L. Random forests. *Machine Learning*. 2001. V. 45. No. 1. Pp. 5-32.
13. McFeeters S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996. V. 17. No. 7. Pp. 1425-1432.
14. Zha Y., Gao J., Ni S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 2003. V. 24. No. 3. Pp. 583-594.
15. Cohen J. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*. 1960. V. 20. No. 1. Pp. 37-46.
16. Congalton R.G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. 1991. V. 37. No. 1. Pp. 35-46.
17. Terekhin E.A. Analysis of the seasonal dynamics of the NDVI vegetation index and reflectance of crops in the Belgorod region. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012. V. 9. No. 4. Pp. 244-252.
18. de Jong R., de Bruin S., de Wit A., Schaepman M.E., Dent D.L. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*. 2011. V. 115. No. 2. Pp. 692-702.
19. Fensholt R., Proud S.R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends – Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 119. Pp. 131-147.
20. Olofsson P., Foody G.M., Herold M., Stehman S.V., Woodcock C.E., Wulder M.A. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 148. Pp. 42-57.
21. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA). Viet Nam: Typhoon Yagi and Floods – Situation Update No. 4 (18 September 2024). 2024. URL: <https://www.unocha.org/publications/report/viet-nam/viet-nam-typhoon-yagi-and-floods-situation-update-no-4-18-september-2024> (accessed 19 Aug. 2026).
22. Forest fire on Mount Son Dao (Thuy Nguyen District, Hai Phong). Bao Hai Phong. 20 October 2024. URL: <https://baohaiphong.vn/vi/hoat-dong-dia-phuong/chay-rung-tai-nui-son-dao-huyen-thuy-nguyen-2024920192527.htm> (accessed 19 Aug. 2026).

Сведения об авторах Принадлежность к организации

Фам Данг Хьен

аспирант, Московский государственный университет геодезии и картографии, 125064, Москва, Россия

Information about authors Affiliations

Pham Dang Hien

Graduate Student, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 125064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 20.08.2026 г.

ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В АНАЛИЗЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ В КАДАСТРОВОЙ, ЗЕМЛЕУСТРОИТЕЛЬНОЙ И ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Атаманов С.А., Горева А.Ю.

Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия
e-mail: npogeo@yandex.ru

Цель исследования состоит в разработке методического подхода к применению технологий искусственного интеллекта в анализе пространственных данных для задач кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности. Подход основан на представлении анализа пространственных данных как формализованного аналитического процесса, включающего формирование аналитического проекта, анализ задачи, формирование алгоритма анализа, выполнение анализа и интерпретацию результатов. Авторским результатом исследования является определение места интеллектуальных компонентов в структуре аналитического процесса и выделение трех направлений применения больших языковых моделей: создание или редактирование метода анализа, формирование алгоритма анализа на основе доступных методов и анализ данных в рамках отдельного метода. Новизна предложенного подхода связана с включением этих возможностей в единый формализованный процесс анализа пространственных данных с сохранением экспертной проверки результатов. Подход апробирован в прототипе сервиса анализа пространственных данных. Апробация показала техническую реализуемость последовательного выполнения методов, передачи результатов между действиями и включения интеллектуальных компонентов в аналитический процесс.

Ключевые слова: большие языковые модели, геоинформационные системы, методы пространственного анализа, алгоритм анализа, интеллектуальная обработка данных, кадастровые данные.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN SPATIAL DATA ANALYSIS FOR CADASTRAL, LAND MANAGEMENT AND URBAN PLANNING ACTIVITIES

Atamanov S.A., Goreva A.Yu.

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

This study develops a methodological approach for incorporating artificial intelligence into spatial data analysis in cadastral, land management and urban planning practice. Rather than treating AI as a stand-alone analytical tool, the proposed approach places intelligent components within a formalized process that starts with an analytical task and continues through method selection, algorithm construction, execution and interpretation. The authors distinguish three practical roles for large language models: drafting or editing an individual analysis method, constructing a draft analysis algorithm from available methods, and processing prepared data within a dedicated method. This distinction represents the main contribution of the study and makes it possible to separate support for method design from support for workflow construction and direct data processing. The approach was tested in a prototype spatial data analysis service. The prototype confirmed the technical feasibility of executing linked methods, transferring intermediate results and embedding intelligent components in the analytical process.

Keywords: large language models, geographic information systems, spatial analysis methods, analysis algorithm, intelligent data processing, cadastral data.

1. Введение

В кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности анализ пространственных данных используется при решении задач, связанных с учетом объектов недвижимости, определением характеристик территорий, выявлением пространственных взаимосвязей и оценкой состояния земель. Рост объема данных, и совместная обработка пространственной и атрибутивной информации повышают требования к организации аналитических процессов.

Развитие цифровых технологий, включая искусственный интеллект, машинное обучение и геоинформационные системы, влияет на исследования и практику в области землеустройства и кадастра. В работах по оценке имущества рассматривается совместный анализ текстовых, визуальных и пространственно обусловленных данных [1]. В архи-

тектурно-градостроительном проектировании искусственный интеллект исследуется как средство поддержки профессиональной деятельности при сохранении за специалистом функций интерпретации и принятия решений [2]. В отечественной литературе рассматриваются варианты применения искусственного интеллекта при работе с данными ЕГРН, кадастровыми материалами и интеллектуальными сервисами [3].

Для научной специальности 1.6.15 «Землеустройство, кадастр и мониторинг земель» развитие сквозных цифровых технологий связывается с обработкой пространственных данных, геоинформационными сервисами и автоматизацией анализа территорий [4]. При этом существующие исследования чаще посвящены отдельным моделям, алгоритмам и программным решениям. Вопрос включения таких компонентов в единый аналитический процесс,

который охватывает постановку задачи, выбор методов, формирование их последовательности и получение результата, требует дальнейшей методической проработки.

В работе технологии искусственного интеллекта рассматриваются как компоненты методики анализа пространственных данных. Они могут использоваться для интерпретации задачи, поддержки выбора методов, формирования алгоритма анализа и выполнения отдельных операций над данными.

Цель исследования состоит в разработке и обосновании методического подхода к применению технологий искусственного интеллекта в анализе пространственных данных в кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности на основе формализованного представления аналитического процесса.

2. Материалы и методы

Материалами исследования послужили научные публикации по применению искусственного интеллекта и цифровых технологий в задачах, связанных с недвижимостью и пространственными данными, описания прикладных задач кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности, а также прототип сервиса анализа пространственных данных, использованный для апробации предложенного подхода.

Методологическую основу составили анализ и обобщение научных источников, структурирование, формализация и логико-содержательное моделирование аналитических процессов. Структурирование использовалось для выделения этапов анализа и определения места интеллектуальных компонентов. Формализация применялась при описании последовательности методов, их входных и выходных данных и параметров.

Для описания внутренней организации анализа использовалось логико-содержательное моделирование. Аналитический процесс представлен как последовательность взаимосвязанных действий над пространственными и атрибутивными данными. На уровне конкретной задачи алгоритм анализа понимается как последовательность методов, выбран-

ных для получения требуемого результата.

Апробация проводилась в прототипе сервиса анализа пространственных данных. Проверялась возможность последовательного выполнения методов, передачи результатов между последовательными действиями аналитического процесса, включения метода нейросетевого анализа, формирования проекта алгоритма с использованием большой языковой модели и создания проекта нового метода. Прототип использовался для проверки технической реализуемости предложенной организации процесса, без оценки производительности или точности больших языковых моделей.

3. Результаты

В результате исследования сформирован подход, в котором анализ пространственных данных рассматривается как формализованный процесс, реализуемый в рамках аналитического проекта. В рамках предлагаемого методического подхода аналитический процесс охватывает постановку задачи, формирование алгоритма, выполнение анализа и интерпретацию результата. Алгоритм анализа определяет последовательность применения методов для конкретной задачи, а метод представляет отдельную операцию обработки пространственных или атрибутивных данных.

В рассматриваемом подходе технологии искусственного интеллекта могут использоваться на разных этапах аналитического процесса. Возможные направления их применения приведены в таблице 1.

Алгоритм анализа пространственных данных реализован в разрабатываемом сервисе. Пример аналитического процесса представлен на рисунке 1.

Представленный прототип демонстрирует техническую реализуемость последовательного выполнения методов анализа пространственных данных и включения метода нейросетевого анализа в общий аналитический процесс. В составе процесса выполняются импорт данных, преобразование атрибутов, пространственные преобразования и аналитическая обработка.

Таблица 1 характеризует возможные направления применения технологий искусственного

Таблица 1

Возможности применения технологий искусственного интеллекта на этапах анализа пространственных данных

Этап аналитического процесса	Содержание этапа	Возможности применения технологий искусственного интеллекта
Формирование аналитического проекта	Определение задачи анализа и параметров исследования	Интерпретация текстового описания аналитической задачи
Анализ задачи	Определение необходимых аналитических операций	Поддержка выбора методов пространственного анализа
Формирование алгоритма анализа	Формирование последовательности методов для решения поставленной задачи	Формирование проекта последовательности аналитических операций
Выполнение анализа	Выполнение методов анализа и получение промежуточных результатов	Поддержка выполнения отдельных аналитических процедур
Интерпретация результатов	Анализ полученных результатов	Поддержка интерпретации при обязательной экспертной проверке

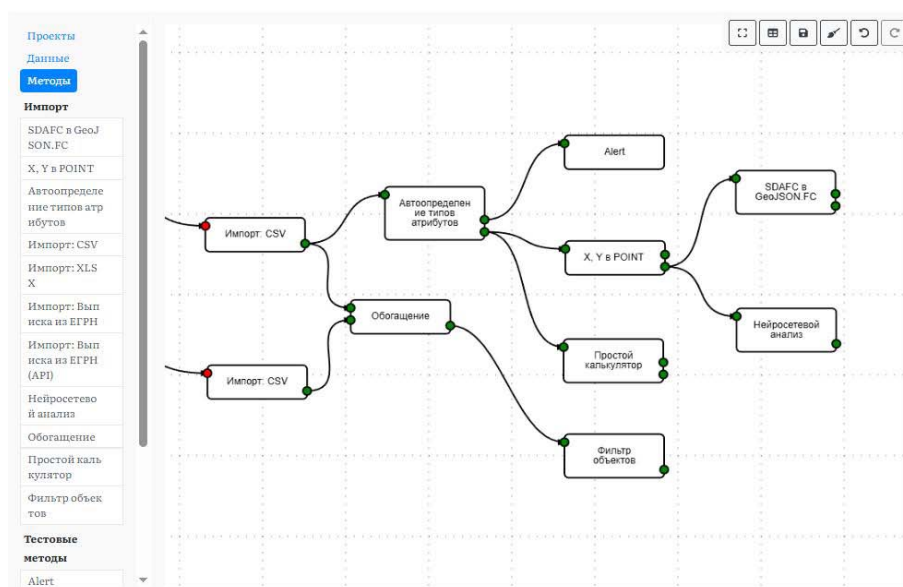


Рис. 1. Реализация алгоритма анализа пространственных данных в сервисе анализа пространственных данных

интеллекта на этапах аналитического процесса. Апробация прототипа позволила конкретизировать три способа применения больших языковых моделей в рамках этого процесса. Они представлены в таблице 2.

В результате апробации предложенного подхода в прототипе выделены три направления применения больших языковых моделей: создание или редактирование отдельного метода анализа, формирование алгоритма на основе доступных методов и

непосредственное применение большой языковой модели в составе отдельного метода обработки данных. Такое разграничение фиксирует разные роли модели в аналитическом процессе.

Рисунки 2, 3 и 4 соответствуют трем выделенным направлениям. На рисунке 2 показано формирование проекта алгоритма, на рисунке 3 непосредственное применение большой языковой модели в составе метода анализа, на рисунке 4 создание проекта нового метода.

Таблица 2

Возможности применения больших языковых моделей при разработке и выполнении методов анализа пространственных данных

Направление применения больших языковых моделей	Содержание	Пример в области землеустройства и кадастров
Создание или редактирование метода	Формирование проекта описания метода анализа пространственных данных, его входных и выходных данных, параметров и выполняемой операции	При необходимости проверки пересечения границ земельного участка с границами территориальной зоны пользователь описывает требуемую операцию. Большая языковая модель формирует проект метода с указанием входных пространственных данных, операции пространственного пересечения, параметров и структуры результата.
Формирование алгоритма анализа	Построение проекта последовательности методов на основе исходных данных и пользовательского описания решаемой задачи	Для задачи выявления правообладателей ранее учтенных объектов недвижимости пользователь формулирует цель и указывает имеющиеся данные. Большая языковая модель формирует проект алгоритма, определяя необходимые методы и последовательность их применения.
Анализ данных	Передача подготовленных данных на вход большой языковой модели в рамках отдельного метода анализа	При обработке сведений об объектах недвижимости отдельному методу с использованием большой языковой модели передаются атрибутивные данные. Модель выполняет заданную операцию и возвращает структурированный результат для последующего использования в аналитическом процессе.

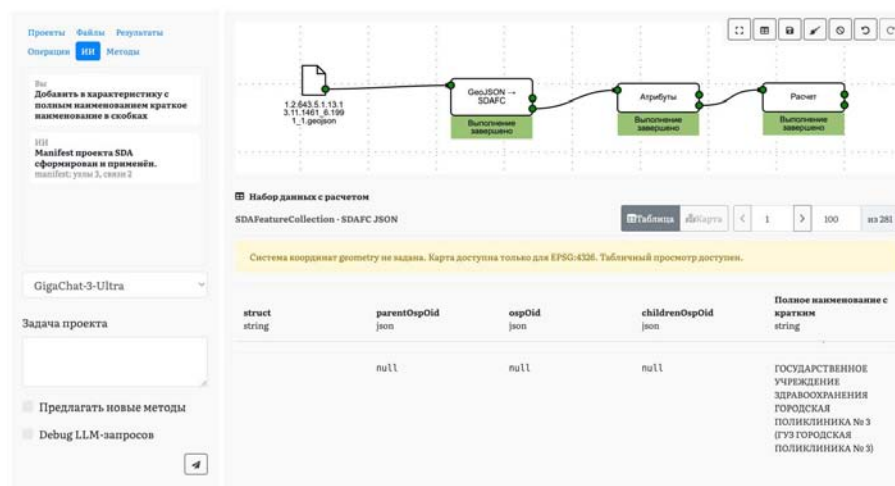


Рис. 2. Пример сформированного с использованием искусственного интеллекта алгоритма обработки данных

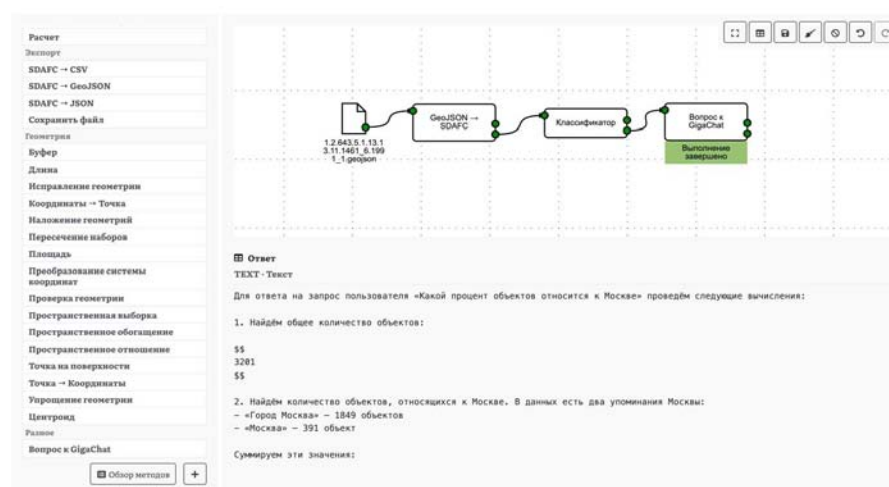


Рис. 3. Пример применения метода анализа данных с использованием искусственного интеллекта

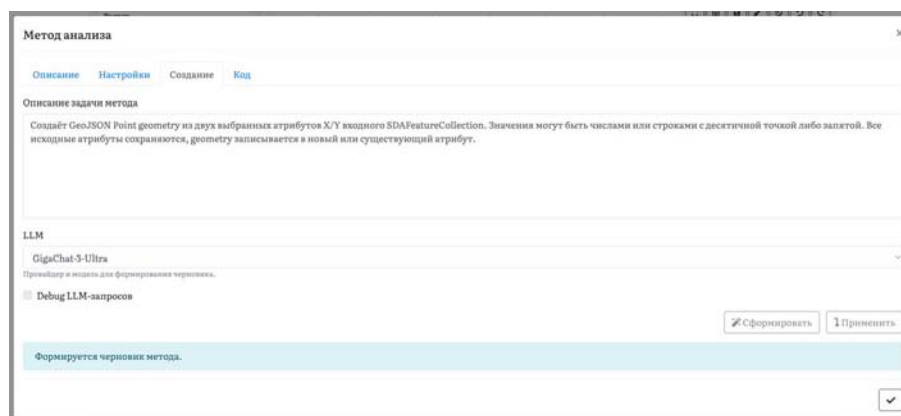


Рис. 4. Пример создания метода анализа с использованием искусственного интеллекта

Результаты, сформированные с использованием больших языковых моделей, требуют экспертной проверки. Метод, сформированный с использованием большой языковой модели, может быть включен в аналитический процесс только после проверки его назначения, входных и выходных данных, параметров и логики выполнения.

4. Обсуждение

Полученные результаты позволяют рассматривать искусственный интеллект как компонент фор-

мализованного процесса анализа пространственных данных. В таком представлении интеллектуальные средства могут поддерживать постановку задачи, выбор методов, формирование алгоритма и выполнение отдельных операций. Результаты, сформированные моделью, используются в рамках методического подхода только после экспертной проверки.

Предложенная постановка согласуется с исследованиями, в которых рассматриваются машинное обучение и мультимодальные подходы в задачах

оценки имущества [1], искусственный интеллект в архитектурно-градостроительном проектировании [2], интеллектуальная обработка кадастровых данных [3] и развитие цифровых технологий в научной специальности 1.6.15 [4]. Работы по интеллектуальным агентным системам также показывают необходимость распределения функций между отдельными компонентами и контроля результатов их взаимодействия [5].

Исследования 3D-кадастра и цифрового представления объектов недвижимости показывают расширение состава и сложности пространственных данных, используемых в кадастровой деятельности [6,7,8]. Это повышает требования к организации аналитического процесса и формализованному описанию применяемых методов.

Отдельное направление современных исследований связано с интеграцией больших языковых моделей и геоинформационных инструментов. Концепция Autonomous GIS рассматривает организацию геопространственного анализа с использованием интеллектуальных компонентов [9]. GeoGPT демонстрирует применение большой языковой модели для понимания геопространственных задач и обращения к специализированным инструментам [10]. В работах по автоматическому формированию цепочек инструментов показана возможность построения последовательностей операций для геопространственных задач [11].

Для предлагаемого подхода существенны исследования, в которых оценивается не только итоговый ответ модели, но и корректность формируемого аналитического процесса. GeoAnalystBench использует набор геопространственных задач для оценки построения аналитических решений и качества программной реализации [12]. Работы по применению ChatGPT в роли геопространственного аналитика показывают потенциал генерации процедур обработки данных и одновременно необходимость проверки результата [13]. ChatGeoAI и GeoTool-GPT развивают подходы к взаимодействию языковых моделей с геоинформационными функциями и инструментами [14,15].

В настоящей работе акцент сделан на месте больших языковых моделей в рамках методического подхода к анализу пространственных данных

для кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности. Выделение трех направлений применения позволяет отдельно рассматривать создание метода, формирование алгоритма и выполнение анализа.

Практическое значение подхода связано с возможностью его использования при разработке специализированных программных средств анализа пространственных данных. Прототип показывает техническую реализуемость предложенной организации процесса. Вопросы оценки качества автоматически сформированных методов, правил их валидации и критериев допустимости результатов требуют дальнейшего исследования.

5. Выводы

Разработан методический подход к применению технологий искусственного интеллекта в анализе пространственных данных для кадастровой, землеустроительной и градостроительной деятельности. Анализ представлен как формализованный процесс, включающий формирование аналитического проекта, анализ задачи, формирование алгоритма, выполнение анализа и интерпретацию результатов.

В результате апробации в прототипе выделены три направления применения больших языковых моделей: создание или редактирование метода анализа, формирование алгоритма на основе доступных методов и непосредственное применение большой языковой модели в составе отдельного метода обработки данных.

Прототип сервиса демонстрирует техническую реализуемость последовательного выполнения методов и включения интеллектуальных компонентов в аналитический процесс. Использование результатов, сформированных с использованием больших языковых моделей, требует экспертной проверки и методологической валидации.

Дальнейшие исследования связаны с развитием методики анализа пространственных данных на основе разработанной классификации методов, формализацией правил построения алгоритмов анализа и разработкой процедур проверки методов, создаваемых или изменяемых с использованием больших языковых моделей.

Список литературы

1. Мансурова С.Б. Технологии машинного обучения и мультимодальные подходы в области оценки имущества // Yashil iqtisodiyot va taraqqiyot. 2025. Т. 3. №6. С. 1682-1690. DOI: 10.5281/zenodo.16879922.
2. Власова Е.Л., Власова М.Л., Боровикова Н.В., Карелин Д.В. Искусственный интеллект в архитектурно-градостроительном проектировании // Architecture and Modern Information Technologies. 2023. №4(65). С. 311-324. DOI: 10.24412/1998-4839-2023-4-311-324.
3. Синица Ю.С., Бородин О.Б., Жданова Р.В., Ковалевская Г.В., Колбнева Е.Ю. Обзор российской и зарубежной практики внедрения искусственного интеллекта в кадастровое обеспечение управления земельными ресурсами // Экономические науки. 2025. №4(245). С. 429-433. DOI: 10.14451/1.245.429.
4. Атаманов С.А., Григорьев С.А., Илюшина Т.В., Литвиненко М.В., Сизов А.П. Новые тренды и технологии в научной специальности 1.6.15. Землеустройство, кадастр и мониторинг земель // Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29. №6. С. 106-119. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-6-106-119.

5. Карамышева Н.С., Зинкин С.А. Взаимодействие когнитивных и реактивных агентов в интеллектуальной вычислительной системе: операционная семантика // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28. №4. С. 138-153. DOI: 10.21869/2223-1560-2024-28-4-138-153.
6. Grzelka K., Pargieła K., Jasińska A., Warchoła A., Bydłosz J. Registration of Objects for 3D Cadastre: An Integrated Approach. Land. 2024. V. 13. No. 12. Art. 2070. DOI: 10.3390/land13122070.
7. Potsiou C., Doulamis N., Bakalos N., Gkeli M., Ioannidis C., Markouizou S. A Prototype Machine Learning Tool Aiming to Support 3D Crowdsourced Cadastral Surveying of Self-Made Cities. Land. 2023. V. 12. No. 1. Art. 8. DOI: 10.3390/land12010008.
8. Sun J., Paasch J. M., Paulsson J., Tarandi V., Harrie L. A BIM-based approach to design a lifecycle 3D property formation process: A Swedish case study. Land Use Policy. 2023. V. 131. Art. 106712. DOI: 10.1016/j.landusepol.2023.106712.
9. Li Z., Ning H. Autonomous GIS: the next-generation AI-powered GIS. International Journal of Digital Earth. 2023. V. 16. No. 2. Pp. 4668-4686. DOI: 10.1080/17538947.2023.2278895.
10. Zhang Y., Wei C., He Z., Yu W. GeoGPT: An assistant for understanding and processing geospatial tasks. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2024. V. 131. Art. 103976. DOI: 10.1016/j.jag.2024.103976.
11. Zhang Y., Li J., Wang Z., He Z., Guan Q., Lin J., Yu W. Geospatial large language model trained with a simulated environment for generating tool-use chains autonomously. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2025. V. 136. Art. 104312. DOI: 10.1016/j.jag.2024.104312.
12. Zhang Q., Gao S., Wei C., Zhao Y., Nie Y., Chen Z., Chen S., Su Y., Sun H. GeoAnalystBench: A GeoAI Benchmark for Assessing Large Language Models for Spatial Analysis Workflow and Code Generation. Transactions in GIS. 2025. V. 29. No. 7. Art. e70135. DOI: 10.1111/tgis.70135.
13. Jiang Y., Yang C. Is ChatGPT a Good Geospatial Data Analyst? Exploring the Integration of Natural Language into Structured Query Language within a Spatial Database. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2024. V. 13. No. 1. Art. 26. DOI: 10.3390/ijgi13010026.
14. Mansourian A., Oucheikh R. ChatGeoAI: Enabling Geospatial Analysis for Public through Natural Language, with Large Language Models. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2024. V. 13. No. 10. Art. 348. DOI: 10.3390/ijgi13100348.
15. Wei C., Zhang Y., Zhao X., Zeng Z., Wang Z., Lin J., Guan Q., Yu W. GeoTool-GPT: a trainable method for facilitating Large Language Models to master GIS tools. International Journal of Geographical Information Science. 2025. V. 39. No. 4. Pp. 707-731. DOI: 10.1080/13658816.2024.2438937.

References

1. Mansurova S. B. kizi. Machine learning technologies and multimodal approaches in property valuation. *Yashil iqtisodiyot va taraqqiyot*. 2025. V. 3. No. 6. Pp. 1682-1690. DOI: 10.5281/zenodo.16879922.
2. Vlasova Ye. L., Vlasova M. L., Borovikova N. V., Karelin D. V. Artificial intelligence in architectural and urban design. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2023. No. 4(65). Pp. 311-324. DOI: 10.24412/1998-4839-2023-4-311-324.
3. Sinitsa Yu.S., Borodina O.B., Zhdanova R.V., Kovalevskaya G.V., Kolbneva Ye. Yu. Review of Russian and international practices of artificial intelligence implementation in cadastral support for land resource management. *Ekonomicheskiye nauki*. 2025. No. 4(245). Pp. 429-433. DOI: 10.14451/1.245.429.
4. Atamanov S.A., Grigor'yev S.A., Ilyushina T.V., Litvinenko M.V., Sizov A.P. New trends and technologies in scientific specialty 1.6.15. Land management, cadastre and land monitoring. *Vestnik SGUGiT*. 2024. V. 29. No. 6. Pp. 106-119. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-6-106-119.
5. Karamysheva N.S., Zinkin S.A. Interaction of cognitive and reactive agents in an intelligent computing system: operational semantics. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2024. V. 28. No. 4. Pp. 138-153. DOI: 10.21869/2223-1560-2024-28-4-138-153.
6. Grzelka K., Pargieła K., Jasińska A., Warchoła A., Bydłosz J. Registration of Objects for 3D Cadastre: An Integrated Approach. Land. 2024. V. 13. No. 12. Art. 2070. DOI: 10.3390/land13122070.
7. Potsiou C., Doulamis N., Bakalos N., Gkeli M., Ioannidis C., Markouizou S. A Prototype Machine Learning Tool Aiming to Support 3D Crowdsourced Cadastral Surveying of Self-Made Cities. Land. 2023. V. 12. No. 1. Art. 8. DOI: 10.3390/land12010008.
8. Sun J., Paasch J. M., Paulsson J., Tarandi V., Harrie L. A BIM-based approach to design a lifecycle 3D property formation process: A Swedish case study. Land Use Policy. 2023. V. 131. Art. 106712. DOI: 10.1016/j.landusepol.2023.106712.
9. Li Z., Ning H. Autonomous GIS: the next-generation AI-powered GIS. International Journal of Digital Earth. 2023. V. 16. No. 2. Pp. 4668-4686. DOI: 10.1080/17538947.2023.2278895.
10. Zhang Y., Wei C., He Z., Yu W. GeoGPT: An assistant for understanding and processing geospatial tasks. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2024. V. 131. Art. 103976. DOI: 10.1016/j.jag.2024.103976.
11. Zhang Y., Li J., Wang Z., He Z., Guan Q., Lin J., Yu W. Geospatial large language model trained with a simulated environment for generating tool-use chains autonomously. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2025. V. 136. Art. 104312. DOI: 10.1016/j.jag.2024.104312.
12. Zhang Q., Gao S., Wei C., Zhao Y., Nie Y., Chen Z., Chen S., Su Y., Sun H. GeoAnalystBench: A GeoAI Benchmark for Assessing Large Language Models for Spatial Analysis Workflow and Code Generation. Transactions in GIS. 2025. V. 29. No. 7. Art. e70135. DOI: 10.1111/tgis.70135.
13. Jiang Y., Yang C. Is ChatGPT a Good Geospatial Data Analyst? Exploring the Integration of Natural Language into Structured Query Language within a Spatial Database. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2024. V. 13. No. 1. Art. 26. DOI: 10.3390/ijgi13010026.
14. Mansourian A., Oucheikh R. ChatGeoAI: Enabling Geospatial Analysis for Public through Natural Language, with Large Language Models. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2024. V. 13. No. 10. Art. 348. DOI: 10.3390/ijgi13100348.
15. Wei C., Zhang Y., Zhao X., Zeng Z., Wang Z., Lin J., Guan Q., Yu W. GeoTool-GPT: a trainable method for facilitating Large Language Models to master GIS tools. International Journal of Geographical Information Science. 2025. V. 39. No. 4. Pp. 707-731. DOI: 10.1080/13658816.2024.2438937.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Атаманов Сергей Александрович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры землеустройства и кадастров факультета управления территориями, Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия

Горева Анастасия Юрьевна

преподаватель кафедры землеустройства и кадастров факультета управления территориями, Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия

Information about authors
Affiliations

Atamanov Sergey Aleksandrovich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor at the Department of Land Management and Cadastres, Faculty of Territory Management, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Goreva Anastasiya Yur'yevna

Lecturer, Department of Land Management and Cadastres, Faculty of Territory Management, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 14.08.2026 г.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОНИТОРИНГ ОХРАННЫХ ЗОН МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ВМЕШАТЕЛЬСТВА ТРЕТЬИХ ЛИЦ

¹Ихсанова Э.А., ²Айдарбекова Д.Р.

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450064, Уфа, Россия

²TotalEnergies SE, 75000, Париж, Франция

e-mail: e.ikh@yandex.ru

В статье рассматриваются современные подходы к выявлению вмешательства третьих лиц в охраняемых зонах магистральных трубопроводов с использованием спутниковых данных дистанционного зондирования Земли и беспилотных летательных аппаратов. Целью исследования является оценка эффективности спутникового мониторинга для обнаружения событий в полосе отвода трубопровода. В качестве методологии использован анализ пилотного проекта спутникового мониторинга, реализованного на трубопроводной системе компании ООО «Сахалинская Энергия». Проведен количественный анализ результатов обнаружения различных типов активности в охранной зоне трубопровода в рамках пилотного мониторинга продолжительностью 12 суток с использованием двух спутниковых съемок. Полученные результаты показали ограниченную эффективность спутниковых методов при выявлении кратковременных событий. В работе также рассматривается применение методов автоматизированного анализа спутниковых данных для формирования заданий на проведение инспекции с использованием БПЛА. На основании проведенного анализа предложен комбинированный подход к мониторингу охраняемых зон трубопроводов, включающий спутниковые данные, БПЛА и автоматизированную поддержку принятия решений.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, дистанционное зондирование Земли, спутниковый мониторинг, БПЛА, вмешательство третьих лиц, автоматизация мониторинга.

AUTOMATED MONITORING OF PIPELINE RIGHT-OF-WAY FOR THIRD-PARTY INTERFERENCE DETECTION

¹Ikhsanova E.A., ²Aidarbekova D.R.

¹Ufa State Petroleum Technological University, 450064, Ufa, Russia

²TotalEnergies SE, 75000, Paris, France

This paper presents an approach for detecting third-party interference in pipeline right-of-way using satellite remote sensing data and unmanned aerial vehicles (UAVs). The study evaluates the effectiveness of satellite monitoring based on a pilot project conducted on the pipeline system of Sakhalin Energy LLC. A quantitative assessment of detection performance was performed for different types of right-of-way activities during a 12-day pilot monitoring period based on two satellite acquisitions. The results show limited capability of satellite monitoring for short-duration events. The paper also considers the use of Advanced Process Control techniques for automated analysis of monitoring data and generation of UAV inspection tasks. A combined monitoring approach integrating satellite data, UAV inspection and automated decision support is proposed.

Keywords: pipeline right-of-way, third-party interference, remote sensing, UAV, advanced process control, automated monitoring.

Введение

В современных условиях эксплуатации магистральных трубопроводов вопросы обеспечения их надежности и безопасности являются одними из наиболее приоритетных. Одной из наиболее значимых угроз остается вмешательство третьих лиц, включающее проведение земляных работ, использование тяжелой техники и иные виды активности в пределах охранной зоны трубопровода.

Практика эксплуатации показывает, что подобные воздействия носят локальный и кратковременный характер. В ряде случаев техника может находиться в зоне трубопровода непродолжительное время, после чего покинуть ее. Это существенно усложняет задачу обнаружения подобных воздействий, особенно при использовании методов мониторинга с низкой частотой наблюдений.

Традиционные методы контроля, такие как наземные обходы и вертолетные облеты, позволяют

выявлять нарушения, однако требуют значительных ресурсов и не обеспечивают непрерывного контроля протяженных участков трубопроводов. В связи с этим активно рассматриваются технологии дистанционного зондирования Земли, а также применение беспилотных летательных аппаратов. Эффективность применения БПЛА для мониторинга охраняемых зон трубопроводов подтверждается современными исследованиями [1].

Дополнительным направлением развития является автоматизация обработки данных мониторинга. В этом случае результаты спутникового наблюдения могут автоматически анализироваться с использованием алгоритмов интеллектуального управления и поддержки принятия решений [2], позволяющих выявлять потенциально опасные изменения и формировать задания на проведение дополнительного обследования.

Литературный обзор. Современные

спутниковые системы дистанционного зондирования Земли предоставляют широкие возможности для мониторинга протяженных объектов, включая магистральные трубопроводы [3,4,5]. В частности, используются радиолокационные спутники с синтезированной апертурой, а также оптические спутники высокого разрешения.

Радиолокационные системы обладают важным преимуществом – они способны получать данные независимо от погодных условий и времени суток [6]. Это особенно актуально для регионов с высокой облачностью. Принцип работы радиолокационных спутников основан на анализе отраженного сигнала и сравнении сцены в различные моменты времени [6,7].

В России используется собственная орбитальная группировка спутников дистанционного зондирования Земли, включающая аппараты «Ресурс-П», «Канопус-В», «Метеор-М», «Электро-Л» и «Арктика-М» [8]. Спутники серии «Ресурс-П» предназначены для получения изображений высокого разрешения [9]. Спутники серии «Канопус-В» применяются для мониторинга природных и техногенных чрезвычайных ситуаций [10].

Дополнительным источником данных дистанционного зондирования Земли являются спутниковые системы европейской программы Copernicus, обеспечивающие регулярное получение радиолокационных и оптических данных для мониторинга протяженных объектов [11].

Материалы и методы. Для оценки эффективности спутникового мониторинга был реализован пилотный проект на трубопроводной системе компании ООО «Сахалинская Энергия». В рамках проекта был выбран участок трубопровода протяженностью около 200 км. Мониторинг выполнялся с использованием спутниковых данных с частотой двух съемок в течение 12 дней.

Для проверки эффективности системы были организованы контролируемые события, имитирующие реальные воздействия. На полосу отвода выводилась техника различных типов, включая экскаваторы, грузовые автомобили, легковые автомобили и строительную технику.

Всего в рамках пилотного проекта было зафиксировано 16 событий [12]. Из них 12 событий находились непосредственно в пределах охранной зоны трубопровода, а 4 события – за ее пределами.

Вероятность обнаружения события длительностью T при средней частоте наблюдений λ может быть представлена выражением [13]:

$$P_{det} = 1 - e^{-\lambda T}$$

где:

P_{det} – вероятность обнаружения события;

λ – частота наблюдений;

T – длительность события.

На рисунке 1 представлена зависимость вероятности обнаружения события от его длительности.

Для формализации оценки эффективности спутникового мониторинга введена классификация типовых событий, возникающих в охранной зоне трубопровода. Для каждого типа события определены характер воздействия, типичная длительность и признаки, по которым событие может быть обнаружено средствами дистанционного зондирования Земли. Обнаружение событий осуществляется на основе анализа изменений радиолокационного сигнала и отражательной способности поверхности, фиксируемых при сравнении спутниковых изображений в различные моменты времени. Классификация типовых событий представлена в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, возможность обнаружения событий спутниковыми средствами определяется характером воздействия на поверхность и

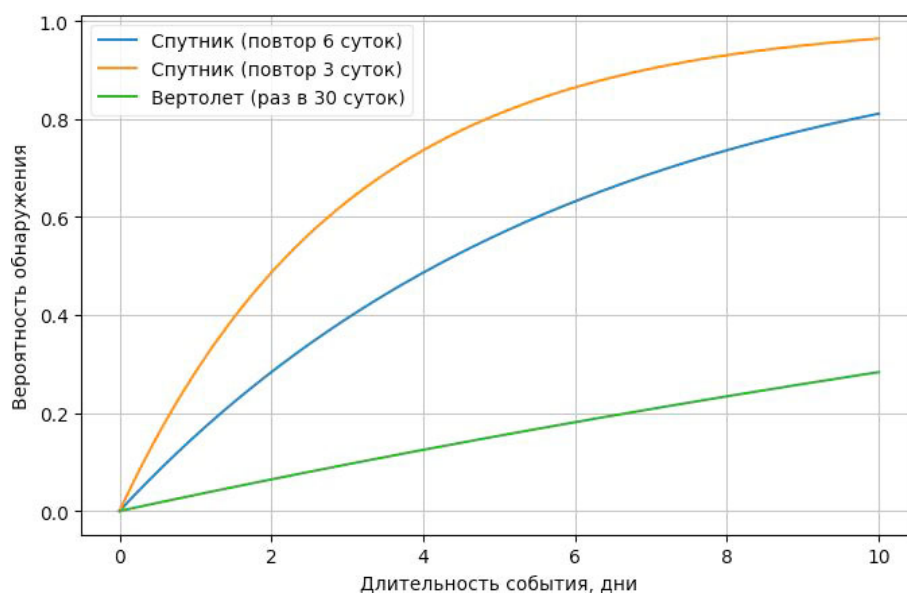


Рис. 1. Зависимость вероятности обнаружения события от длительности события при различной частоте наблюдений

Таблица 1

Классификация типовых событий и признаки обнаружения

Тип события	Характер воздействия	Время воздействия	Признак обнаружения
Земляные работы (экскаватор, кран)	Нарушение рельефа и перемещение грунта	1-5 суток	локальное изменение радиолокационного сигнала и геометрии поверхности
Расчистка растительности	Удаление растительного покрова	2-7 суток	изменение отражательной способности и текстуры поверхности
Работа строительной техники	Уплотнение грунта, следы техники	1–3 суток	появление линейных нарушений поверхности
Стоянка техники	Временное присутствие объекта	несколько часов – 1 сутки	точечное изменение радиолокационного сигнала
Движение автотранспорта	Кратковременное перемещение	минуты – часы	кратковременное изменение сигнала без устойчивого изменения поверхности
Полевые работы (трактор)	Проезд техники без нарушения рельефа	1-2 суток	локальное изменение растительного покрова

Таблица 2

Перечень контролируемых событий пилотного проекта

№	Тип события	Техника	Обнаружено спутником	Комментарий
1	Земляные работы	экскаватор, грузовик	Да	координаты определены неточно
2	Земляные работы	кран, экскаватор, 2 грузовика	Да	обнаружено корректно
3	Стоянка техники	грузовик	Нет	событие вне коридора
4	Земляные работы	кран, экскаватор	Да	повторное обнаружение
5	Движение автотранспорта	автомобили	Нет	изменение растительности
6	Движение автотранспорта	автомобили	Нет	изменений не выявлено
7	Расчистка растительности	мульчер (2 ед.)	Да	сложный рельеф
8	Движение автотранспорта	автомобили	Нет	не обнаружено
9	Работа строительной техники	экскаватор, грузовик	Нет	не обнаружено
10	Расчистка растительности	мульчер	Да	изменение растительности
11	Полевые работы	трактор	Нет	не обнаружено
12	Движение автотранспорта	автомобиль	Нет	не обнаружено
13	Расчистка растительности	мульчер	Да	обнаружено
14	Расчистка растительности	мульчер	Да	повторное событие
15	Расчистка растительности	мульчер + авто	Да	обнаружено
16	Движение автотранспорта	легковые авто	Нет	не обнаружено

длительностью события. Наиболее уверенно будут выявляться события, сопровождающиеся устойчивым изменением рельефа или растительного покрова. Кратковременные события, такие как движение транспорта или стоянка техники, формируют слабые или кратковременные изменения сигнала и об-

наруживаются значительно хуже.

Результаты. Из общего количества 16 событий спутниковой системой были обнаружены около 8 событий. Таким образом, вероятность обнаружения составила около 50% [12].

Анализ показал, что эффективность

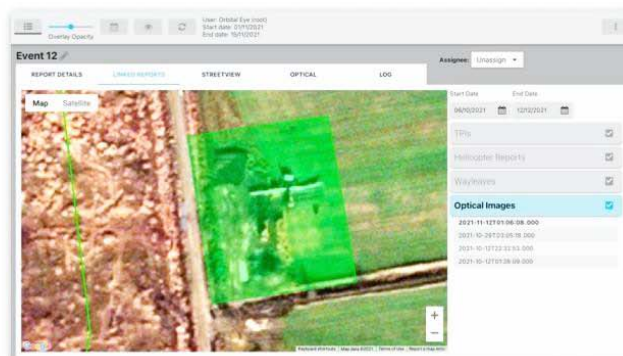
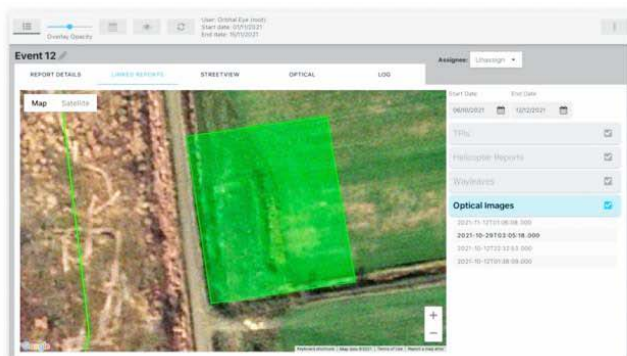


Рис. 2. Пример обнаружения техники в охранной зоне трубопровода

существенно зависит от типа события. Для длительных земляных работ вероятность обнаружения составляла порядка 80-90%. Для активности средней длительности вероятность обнаружения составляла 50-70%. Для кратковременных событий вероятность обнаружения снижалась до 30% и ниже.

Пример обнаруженного транспортного средства представлен на рисунке 2.

Обсуждение. Полученные результаты показывают, что спутниковый мониторинг демонстрирует ограниченную эффективность при выявлении кратковременных воздействий [4,5]. Это связано с низкой частотой повторного наблюдения спутников.

Кратковременные события могут происходить между моментами съемки и не фиксироваться системой.

Беспилотные летательные аппараты обеспечивают более высокую детализацию и могут применяться по требованию. Таким образом спутниковый

мониторинг целесообразно использовать для выявления зон потенциального риска, тогда как БПЛА – для подтверждения событий.

Дополнительно система мониторинга может быть дополнена автоматизированной обработкой данных. В этом случае спутниковые данные анализируются автоматически, после чего формируется задание на запуск БПЛА.

Заключение. Проведенный анализ показал, что эффективность спутникового мониторинга составляет порядка 50-60%. Для кратковременных событий вероятность обнаружения снижается до 30% и ниже.

Использование спутниковых технологий в качестве единственного инструмента мониторинга не обеспечивает требуемого уровня надежности. Наиболее эффективным является комбинированный подход, объединяющий спутниковый мониторинг, БПЛА и автоматизированную обработку данных.

Список литературы

1. Li S., Zhang Y., Wang J. UAV-Based Inspection Technologies for Pipeline Monitoring. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 14. Pp. 4782-4798.
2. Qin S.J., Badgwell T.A. A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology. *Control Engineering Practice*. 2003. Vol. 11. No. 7. Pp. 733-764.
3. Ричардс Дж. Анализ изображений дистанционного зондирования Земли: монография. М.: Техносфера. 2013. 456 с.
4. Mohamadi B., Zhang Y., Prinett V. Monitoring pipeline right-of-way using satellite imagery and change detection techniques. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2020. Vol. 13. Pp. 5624-5635.
5. Zhang J., Wang Y., Li X. Detection of third-party interference along pipelines using SAR remote sensing data. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. No. 15. Pp. 2978-2994.
6. Кёрландер Дж., Макдона Р. Радиолокационные системы с синтезированной апертурой: монография. М.: Радио и связь. 2012. 312 с.
7. Sentinel-1 User Guide [Электронный ресурс]. European Space Agency. Режим доступа: <https://sentinel.esa.int> (дата обращения: 04.04.2026).
8. Действующие космические аппараты дистанционного зондирования Земли [Электронный ресурс] / НЦ ОМЗ Роскосмос. Режим доступа: https://ntsomz.ru/remote_sensing_spacecraft (дата обращения: 04.04.2026).
9. Космический аппарат «Ресурс-П» [Электронный ресурс] / Роскосмос. Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru> (дата обращения: 04.04.2026).
10. Космический аппарат «Канопус-В» [Электронный ресурс] / Роскосмос. Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru> (дата обращения: 04.04.2026).
11. Copernicus Programme [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.copernicus.eu> (дата обращения: 04.04.2026).
12. Материалы пилотного проекта спутникового мониторинга охранной зоны магистральных трубопроводов ООО «Сахалинская Энергия». Южно-Сахалинск. 2021.
13. Росс С. Введение в модели теории вероятностей: учеб. пособие. М.: Мир. 2010. 384 с.

References

1. Li S., Zhang Y., Wang J. UAV-Based Inspection Technologies for Pipeline Monitoring. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 14. Pp. 4782-4798.
2. Qin S.J., Badgwell T.A. A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology. *Control Engineering Practice*. 2003. Vol. 11. No. 7. Pp. 733-764.

3. Richards J.A. *Analiz izobrazheniy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: monografiya* [Remote Sensing Digital Image Analysis]. Moscow: Tekhnosfera Publ. 2013. 456 p.
4. Mohamadi B., Zhang Y., Prinnet V. Monitoring pipeline right-of-way using satellite imagery and change detection techniques. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2020. Vol. 13. Pp. 5624-5635.
5. Zhang J., Wang Y., Li X. Detection of third-party interference along pipelines using SAR remote sensing data. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. No. 15. Pp. 2978-2994.
6. Curlander J.C., McDonough R.N. *Radiolokatsionnyye sistemy s sintezirovannoy aperturoy: monografiya* [Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing]. Moscow: Radio i Svyaz Publ. 2012. 312 p.
7. Sentinel-1 User Guide. European Space Agency. Available at: <https://sentinel.esa.int> (accessed: 04.04.2026).
8. Current Earth Remote Sensing Spacecraft. National Center for Earth Observation, Roscosmos. Available at: https://ntsomz.ru/remote_sensing_spacecraft (accessed: 04.04.2026).
9. Resurs-P Spacecraft. Roscosmos. Available at: <https://www.roscosmos.ru> (accessed: 04.04.2026).
10. Kanopus-V Spacecraft. Roscosmos. Available at: <https://www.roscosmos.ru> (accessed: 04.04.2026).
11. Copernicus Programme. Available at: <https://www.copernicus.eu> (accessed: 04.04.2026).
12. Materials of the Pilot Project on Satellite Monitoring of Pipeline Right-of-Way. Sakhalin Energy LLC. Yuzhno-Sakhalinsk. 2021.
13. Ross S. *Vvedeniye v modeli teorii veroyatnostey: ucheb. posobiye* [Introduction to Probability Models]. Moscow: Mir. 2010. 384 p.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Ихсанова Элина Айдаровна

бакалавр, Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450064, Уфа, Россия

Айдарбекова Дилия Робертовна

инженер КиП и АСУТП, ТотальЭнерджис СЕ, 75000, Париж, Франция,

Information about authors
Affiliations

Ikhsanova Elina Aydarovna

Bachelor's student, Ufa State Petroleum Technological University, 450064, Ufa, Russia

Aidarbekova Dilia Robertovna

Instrumentation and Control Systems Engineer, TotalEnergies SE, 75000, Paris, France

Поступила в редакцию 04.08.2026 г.

ОРГАНИЗАЦИЯ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ДОСТУПА К ДАННЫМ ГИС С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕМЕНТОВ ОБЪЕДИНЯЕМОЙ ПОДГРУППЫ АМАЛЬГАМЫ

Лоссов К.И.

Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия
e-mail: konsiv@gmail.com

В условиях обработки и хранения больших объемов связанных пространственно-временных данных критически возрастает потребность в бесшовных криптографических методах разграничения доступа, обладающих постквантовой стойкостью. Целью исследования является разработка иерархической схемы шифрования топологии и атрибутов графовых баз ГИС, позволяющей хранить зашифрованную информацию в виде единой монолитной строки, доступ к сегментам которой дифференцируется динамически в зависимости от роли субъекта в древовидной структуре прав. В основу предложенного подхода положен оригинальный математический синтез аппарата комбинаторной теории групп – свободного произведения групп с объединенной подгруппой и классической криптографической схемы Акла-Тейлора для частично упорядоченных множеств классов безопасности. Разграничение доступа реализуется за счет уникальных свойств приведения групповых слов к нормальной форме.

Разработана технология сериализации элементов графа с использованием алфавита представителей левых смежных классов множителей амальгамы. Показано, что суперпользователь, обладая полным набором постоянных элементов (ключей) из объединяемой подгруппы, способен дешифровать любой подграф. Для нижестоящих уровней СУБД генерируются ключи на основе однонаправленного каскадного «просачивания» элементов подгруппы сквозь блоки под действием автоморфизмов. Это обеспечивает автоматический доступ пользователя ко всем подчиненным узлам при его полной изоляции от параллельных ветвей графа.

Предложенная схема исключает избыточность хранения и претендует на постквантовую стойкость, обусловленную SQ-универсальностью амальгам. Наличие «алгебраического остатка» на конце строки обеспечивает встроенный контроль целостности данных, исключая несанкционированную подмену графа злоумышленником.

Ключевые слова: графовые базы данных, разграничение прав доступа, контроль целостности графа, свободное произведение с объединением, нормальная форма, представители смежных классов, сдвиговой множитель, аутентифицированное шифрование, постквантовая криптография.

HIERARCHICAL GIS DATA ACCESS VIA ELEMENTS OF AMALGAMATED SUBGROUP

Lossov K.I.

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

Managing and securing massive spatiotemporal datasets critically demands seamless cryptographic access control mechanisms capable of withstanding post-quantum threats. This paper introduces a hierarchical encryption framework designed specifically for the topology and attributes of graph-based GIS databases. The proposed method consolidates encrypted information into a single monolithic string, where segment-level access is dynamically adjusted according to the user's role within a tree-like privilege structure. At its core, the approach relies on a novel mathematical synthesis that blends combinatorial group theory – specifically, the free product of groups with an amalgamated subgroup – with the classical Akl-Taylor cryptographic scheme tailored for partially ordered security classes. Security enforcement hinges on the inherent algebraic properties of group words when reduced to their normal form.

We also present a novel graph serialization technique that utilizes the alphabet of left coset representatives derived from the amalgam factors. Within this framework, a superuser holding a complete set of static keys from the amalgamated subgroup can successfully decrypt any given subgraph. For lower-level database management systems, subordinate keys are derived through a unidirectional cascading «percolation» of subgroup elements across blocks, driven by automorphisms. This mechanism guarantees that users automatically inherit access to all descendant nodes while remaining strictly isolated from parallel branches of the graph topology.

By architecture, the scheme eliminates storage overhead and achieves post-quantum resilience rooted in the SQ-universality of amalgams. Furthermore, an «algebraic remainder» appended to the end of the data string functions as a built-in integrity check, effectively preventing malicious graph tampering or unauthorized payload substitution.

Keywords: graph databases; access control; graph integrity control; free product with amalgamation; normal form; coset representatives; shift multiplier; authenticated encryption; post-quantum cryptography.

Введение

Обеспечение конфиденциальности, целостности и доступности пространственно-временных данных (ПВД) является одной из наиболее сложных задач современной геоинформационной безопас-

ности. Еще в 1983 году [1] поднималась проблема контроля доступа для организаций с иерархической структурой, таких как правительство, дипломатический корпус, армия, в управлении базами данных, содержащими конфиденциальную информацию,

или в защите промышленных секретов. Там же было предложено решение проблемы контроля доступа в иерархии, основанное на криптографии, при этом иерархия представлена частично упорядоченным множеством. Однако простая реализация этой схемы требует от пользователей, занимающих высокие позиции в иерархии, хранения большого количества криптографических ключей. Ввиду этого, авторами осуществлена попытка достижения компромисса между временем и хранением для решения проблемы управления ключами. В работе [2] замечено, что всеобъемлющая структура, достаточно общая и гибкая для работы с пространственными аспектами в реальных приложениях, все еще отсутствует. Там же предложено расширение GEO-RBAC для поддержки иерархий, моделирования разрешений, наследования пользователей и активаций, а также ограничений разделения обязанностей. Продолжением работы [1] являются, в частности, современные статьи [3,4]: в [3] описывается готовый к практике инженерный инструмент, основанный на геометрии подпространств, а в [4] поверх жестких криптографических замков добавлена «умная» система поведенческого контроля. О неугасающем интересе к представленной в работе тематике свидетельствуют, например, работы [5,6,7].

Динамические ПВД, циркулирующие в системах мониторинга беспилотного транспорта, спутникового позиционирования (GNSS) и интернета вещей (IoT), принципиально отличаются от традиционных текстовых или числовых массивов. В практике защиты геоданных существует несколько подходов к безопасности: использование туннелирования (VPN, IPsec), шифрования транспортного уровня (TLS/SSL) и межсетевых экранов. Такой подход защищает только канал передачи («трубу»), но оставляет данные абсолютно уязвимыми внутри конечных узлов распределенной системы или при их хранении в базах данных ГИС. Кроме того, он не обеспечивает разграничения прав доступа к отдельным слоям или элементам геоданных. Другими методами являются использование алгоритмов внесения искусственного шума (при этом безвозвратно ухудшается точность позиционирования для высокоточных систем), а также сквозное криптографическое шифрование при помощи блочных (AES, «Кузнечик») или потоковых (ChaCha20, «Магма» в режиме гаммирования) шифров, применяющихся непосредственно к координатным массивам. Последний подход теоретически более надежен, однако его стандартная реализация сталкивается с жесткими ресурсными ограничениями.

Традиционные архитектурные модели контроля доступа (такие как GEO-RBAC [2]) реализуются на уровне программного обеспечения ГИС-серверов или СУБД, что оставляет данные уязвимыми при прямом компрометировании базы данных. Крипто-

графические методы защиты иерархических баз данных (например, схемы на основе HIBE или Акла-Тейлора [1]) зачастую приводят к высокой избыточности ключевой информации из-за необходимости изолированного шифрования разных уровней детализации объектов карт. Кроме того, они демонстрируют уязвимость к специфическим атакам, направленным на подмену или сдвиг пространственных координат внутри зашифрованных таблиц. В данной работе предлагается преодолеть указанные ограничения за счет внедрения алгебраических структур непосредственно в контур криптографической защиты хранилищ ГИС. Применение математического аппарата амальгамы групп [8] позволяет реализовать гибкий механизм каскадного управления доступом к векторным объектам на уровне физического хранения, обеспечивая однопроходную аутентификацию данных за счет жестких правил нормализации слов в амальгамах, которые при определенных условиях обладают свойством SQ-универсальности [9,10], что обуславливает высокую вычислительную сложность проблемы принадлежности элемента к двойному смежному классу и делает эти системы надежным фундаментом для защиты от квантового криптоанализа. Однако до сих пор потенциал указанных объектов практически не исследовался применительно к обеспечению безопасности сложных ветвящихся топологий в графовых базах данных ГИС.

Материалы и методы

Определение. Если W – групповое слово из $G=\langle A*B, H=K, \varphi \rangle$, а $W_n=c_1 \cdots c_n \cdot h$ – его нормальная форма, тогда

$$\text{унф}(W)=c_1 \cdots c_n$$

будем называть *усеченной нормальной формой* W .

Определение. Пусть h – элемент объединяемой подгруппы, W – слово, записанное в нормальной форме, причем $\text{унф}(W)=W \notin H$. Тогда элемент $h \cdot W$ после приведения к нормальной форме примет вид $\tilde{W} \cdot h_w$, где $\tilde{W}=\text{унф}(h \cdot W)$, $h_w \in H$. Элемент h_w будем называть остатком мультипликативной редукции произведения $h \cdot W$.

Для h_w выполняется равенство

$$h \cdot W = \tilde{W} \cdot h_w \quad (1)$$

Пусть ψ_h – функция, заданная на множестве слов W из определения выше, такая, что

$$\psi_h(W)=h_w$$

В дальнейшем нам будет удобно вместо $\psi_h(W)$ писать $h(W)$, таким образом

$$\psi_h(W)=h(W)=h_w$$

Организацию иерархического доступа к графовой базе данных объясним на примере.

Пусть имеется взвешенный граф, являющийся корневым деревом (см. рис.), с вершинами $\{1,1\}$, $\{2,1\}$, $\{2,2\}$, $\{2,3\}$, $\{3,1\}$, ..., $\{3,6\}$, где первый индекс означает номер уровня, а второй – номер вершины на этом уровне, и ребрами с весами W_{11} , W_{21} , W_{22} , W_{23} , W_{31} , ..., W_{36} , являющимися базами данных, представленными групповыми словами амальгамы. Метки вершин будут являться идентификаторы пользователей соответствующего уровня (например, вершине $\{1,1\}$ соответствует пользователь $]1,1[$).

Для шифрования объединенной графовой базы (включающей в себя базы $W_{11}, \dots, W_{36}$), изображенной на рисунке, выбираются секретные элементы

$$h_{11}, h_{21}, h_{22}, h_{23}, h_{31}, h_{32}, h_{33}, h_{34}, h_{35}, h_{36}, \quad (2)$$

принадлежащие объединяемой подгруппе. Далее, W_{11} умножается слева на h_{11} и, после приведения произведения $h_{11} \cdot W_{11}$ к нормальной форме, получаем $\tilde{W}_{11} \cdot h_{11} (W_{11})$, где $\tilde{W}_{11}$ – зашифрованная база W_{11} , а $h_{11} (W_{11})$ – остаток мультипликативной редукции. Аналогично шифруются базы W_{21} , W_{22} , W_{23} , используя множители

$$h_{21}^o = h_{11}(W_{11}) \cdot h_{21}, h_{22}^o = h_{11}(W_{11}) \cdot h_{22}, h_{23}^o = h_{11}(W_{11}) \cdot h_{23}, \quad (3)$$

а затем базы W_{3k} , $k=1, \dots, 6$ при помощи элементов

$$\begin{aligned} h_{3j}^o &= h_{21}^o(W_{21}) \cdot h_{3j}, j=1,2,3; h_{34}^o = h_{22}^o(W_{22}) \cdot h_{34}; \\ h_{3m}^o &= h_{23}^o(W_{23}) \cdot h_{3m}, m=5,6. \end{aligned} \quad (4)$$

Применяемый алгоритм шифрования подробно описан в работе [11], при сохранении требований ненормальности и некоммутативности объединяемой подгруппы.

Пользователю $]1,1[$ первого (высшего) уровня

доступа передаются ключи шифрования-дешифрования (для дешифрования применяется умножение на элементы, обратные h_{11} , (3) и (4)). Пользователям $]2,1[$, $]2,2[$, $]2,3[$ второго уровня передаются наборы ключей $h_{21}^o, h_{31}, h_{32}, h_{33}; h_{22}^o, h_{34}; h_{23}^o, h_{35}, h_{36}$ соответственно. Ключи шифрования-дешифрования (4) передаются пользователям $]3,i[$, $i=1, \dots, 6$, причем $]3,i[$ передается только ключ h_{3i}^o .

Пользователь $]3,k[$ ($k=1, \dots, 6$) может расшифровать только базу W_{3k} ; $]2,1[$ может расшифровать базы $\tilde{W}_{21}, \tilde{W}_{31}, \tilde{W}_{32}, \tilde{W}_{33};]2,2[- \tilde{W}_{22}, \tilde{W}_{34};]2,3[- \tilde{W}_{23}, \tilde{W}_{35}, \tilde{W}_{36}$. Пользователь первого уровня $]1,1[$ может расшифровать любую из баз второго и третьего уровней и $\tilde{W}_{11}$.

Элементы (2) за исключением h_{11} являются множителями-сдвигами, препятствующими пользователям низкого уровня получать доступ к базам более высокого уровня, поскольку, зная только произведение элементов, невозможно однозначно восстановить сомножители. Так элемент h_{2i} является сдвиговым элементом, препятствующим пользователю $]2,i[$ ($i=1, \dots, 3$) получить доступ к базе W_{11} , поскольку для расшифровки $\tilde{W}_{11}$ требуется знание элемента $h_{11} (W_{11})$, но у него в распоряжении имеется только $h_{21}^o = h_{11}(W_{11}) \cdot h_{21}$. Также h_{3k} гарантирует защиту баз пользователей $]2,i[$ от несанкционированного прочтения пользователями $]3,k[$, $k=1, \dots, 6$.

Если обращения от пользователей к базам более высокого уровня блокируются, то вместо набора (2) можно взять единственный элемент h_{11} , которым шифруется W_{11} . Затем база W_{2i} шифруется элементом $h_{11} (W_{11})$, а пользователям $]2,i[$ передаются ключи шифрования $(h_{11} (W_{11}))(W_{2i})$ для создания баз $\tilde{W}_{3k}$, ключи дешифрования которых $((h_{11} (W_{11}))(W_{2i}))^{-1}$ направляются пользователям $]3,k[$.

При изменении любой из баз – W_{31}, W_{32}, W_{33} , пользователь $]2,1[$ заменяет ключи для пользователей $]3,1[$, $]3,2[$, $]3,3[$, используя (4). Аналогично

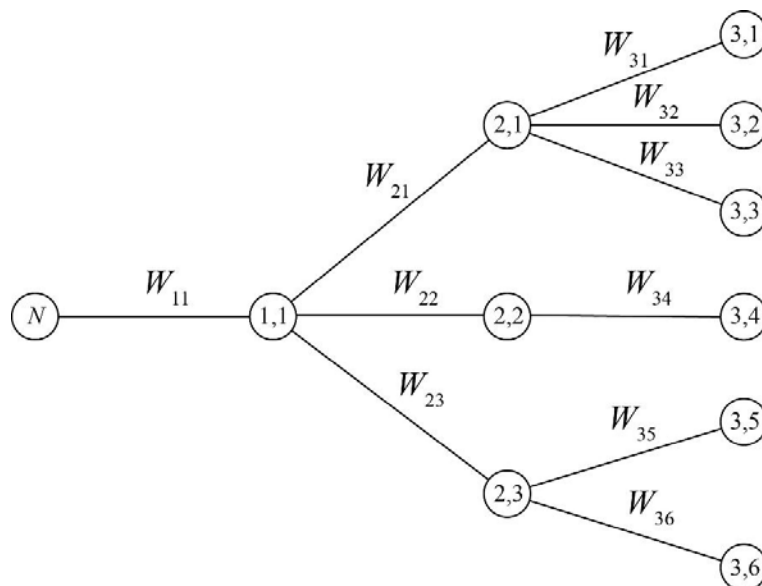


Рис. 1. Схема базы данных

поступают пользователи [2,2[и [2,3[, заменяя ключи для [3,4[и [3,5[, [3,6[соответственно при изменении баз W_{34} или W_{35} , W_{36} . При изменении базы W_{2i} , $i=1,2,3$, пользователь [1,1[формирует для [2, i [новый ключ, применяя равенство (3), и уже пользователь [2, i [создает новые ключи для шифрования соответствующих баз W_{3k} (например, при $i=2$ создается ключ для W_{34}). В случае модернизации W_{11} заменяются все ключи согласно равенствам (1), (3), (4).

Замечание. Выбранные элементы (2) не требуют замены при трансформации баз, при этом модернизация какой-либо базы более высокого уровня требует замены ключей у пользователей уровней ниже.

При оцифровке баз $W_{11}, \dots, W_{36}$ левыми смежными классами потребуются, чтобы получающиеся при этом слова начинались с элемента, принадлежащего одной группе, например, A , и оканчивались элементом, принадлежащим другому множителю (здесь это B). В случае, если какое-то слово из $W_{11}-W_{36}$ оканчивается на $a \in A$, то дописывается представитель левого смежного класса $B:K$, соответствующий выбранному техническому символу, например, пробелу. Таким образом, объединенная база данных представляется в виде группового слова $W_{11}W_{21}W_{22}W_{23}W_{31} \dots W_{36}$, записанного в нормальной форме.

Пользователям, кроме {1,1}, необходимо предоставить позиции в слове, соответствующие их уровню доступа.

Пример

Рассмотрим базу данных, сформированную по схеме, изображенной на рисунке, на примере модельной группировки спутников, предназначенных для мониторинга земной поверхности:

– W_{11} содержит информацию о всей группировке: количество спутников, общее состояние работоспособности системы и структуры содержащихся в ней данных – это информация первого уровня;

– каждое из слов W_{21} , W_{22} , W_{23} содержит информацию о конкретном спутнике: идентификатор в системе, дату и время записи данных, координаты и составляющие скорости – это информация второго уровня;

– каждое из слов W_{3k} ($k=1, \dots, 6$) содержит матрицу данных, соответствующих местности съемки; при $k=1, 2, 3$ рассмотрены данные разных каналов мультиспектральной съемки, при $k=4$ приведена матрица результатов радиолокационной съемки с комплексными элементами, при $k=5, 6$ приведены данные высоты поверхности моря (SSH) и высоты значительных волн (SWH), полученные из обработки альтиметрических измерений – это информация третьего уровня.

Рассмотрим результаты шифрования-дешифрования данных по пути {1,1} – {2,3} – {3,5}. В

качестве платформы выбрано свободное произведение групп $A=A_{14}$ и $B=A_{14}$, с подгруппами $H=A_{12}$ и $K=Stab_{A_{12}}$ (6,7), объединенными посредством изоморфизма $\varphi(h)=k_0 \cdot h \cdot k_0^{-1}$, где $k_0=(6,13)(7,14)$. Также абоненты открыто выбирают алфавит из представителей левых смежных классов, содержащий в себе строчные и прописные буквы русского, латинского и греческого алфавитов, числа и специальные символы. Кроме того, заранее устанавливается, что каждое групповое слово W должно начинаться с представителя группы A и заканчиваться представителем группы B , в случае необходимости (нечетного количества элементов в слове) оно дополняется заранее выбранным нейтральным элементом, например, нижним подчеркиванием « $_$ » (в заданном алфавите символизирует пробел), принадлежащим множителю B .

Пусть W_{11} содержит следующую информацию (без пробелов):

Группировка *Аестофθαλμος*; Всего_5; Активные_А1, А3, А4; Запасные_А2, А5; Состояние=хор; 2у=3; 3у=6_1=3, 2=1, 3=2.

Если присвоить элементам алфавита (представителям смежных классов) числовые индексы в списке и поставить им в соответствие стандартный алфавит, то W_{11} можно записать следующим образом:

a[35], b[16], a[19], b[15], a[15], b[9], a[16], b[14], a[3], b[10], a[1], b[173], a[149], b[129], a[143], b[139], a[145], b[132], a[125], b[135], a[136], b[139], a[142], b[176], a[34], b[17], a[6], b[4], a[14], b[173], a[120], b[176], a[32], b[10], a[18], b[9], a[3], b[13], a[27], b[6], a[173], b[89], a[116], b[175], a[89], b[118], a[175], b[89], a[119], b[176], a[39], b[1], a[15], b[1], a[17], b[13], a[27], b[6], a[173], b[89], a[117], b[175], a[89], b[120], a[176], b[48], a[14], b[17], a[18], b[14], a[31], b[13], a[9], b[6], a[181], b[21], a[14], b[16], a[176], b[117], a[19], b[181], a[118], b[176], a[118], b[19], a[181], b[121], a[173], b[116], a[181], b[118], a[175], b[117], a[181], b[116], a[175], b[118], a[181], b[117]

Аналогично записывается W_{23} :

А3; 15082026; 02.15.30; $X=1425390.124$; $Y=5214080.453$; $Z=4589120.782$; $V_x=-5120.34$; $V_y=-1450.56$; $V_z=4850.56$;

или

a[89], b[118], a[176], b[116], a[120], b[115], a[123], b[117], a[115], b[117], a[121], b[176], a[115], b[117], a[174], b[116], a[120], b[174], a[118], b[115], a[176], b[112], a[181], b[116], a[119], b[117], a[120], b[118], a[124], b[115], a[174], b[116], a[117], b[119], a[176], b[113], a[181], b[120], a[117], b[116], a[119], b[115], a[123], b[115], a[174], b[119], a[120], b[118], a[176], b[114], a[181], b[119], a[120], b[123], a[124], b[116], a[117], b[115], a[174], b[122], a[123], b[117], a[176], b[110], a[86], b[181], a[179], b[120], a[116], b[117], a[115], b[174], a[118], b[119], a[176], b[110], a[87], b[181], a[179], b[116], a[119], b[120], a[115],

b[174], a[120], b[121], a[176], b[110], a[88], b[181], a[119], b[123], a[120], b[115], a[174], b[120], a[121], b[176]

Для W_{35} – матрицы значений измеренных величин, запятая выступает разделителем между элементами в строке, точка с запятой обозначает переход на новую строку:

-27.15, -27.18, -27.20, -27.22; -27.17, -27.20, -27.23, -27.25; -27.20, -27.22, -27.24, -27.27 _

или

a[179], b[117], a[122], b[174], a[116], b[120], a[175], b[179], a[117], b[122], a[174], b[116], a[123], b[175], a[179], b[117], a[122], b[174], a[117], b[115], a[175], b[179], a[117], b[122], a[174], b[117], a[117], b[176], a[179], b[117], a[122], b[174], a[116], b[122], a[175], b[179], a[117], b[122], a[174], b[117], a[115], b[175], a[179], b[117], a[122], b[174], a[117], b[118], a[175], b[179], a[117], b[122], a[174], b[117], a[120], b[176], a[179], b[117], a[122], b[174], a[117], b[115], a[175], b[179], a[117], b[122], a[174], b[117], a[117], b[175], a[179], b[117], a[122], b[174], a[117], b[119], a[175], b[179], a[117], b[122], a[174], b[117], a[122], b[173]

Для шифрования этого пути выбраны секретные элементы:

$h_{11}=(2, 6, 7, 11, 5) (3, 12, 10, 9, 4), h_{23}=(1, 10, 7, 9, 11)(2, 12, 3, 5, 6, 8, 4), h_{35}=(1, 4, 5, 2, 6, 10, 12) (3, 9, 7, 8, 11).$

Шифрование базы:

1. Пользователь]1,1[вычисляет $h_{11} W_{11}=\tilde{W}_{11} \cdot k_{w11}$, где $\tilde{W}_{11}$ равняется

a[175], b[158], a[64], b[65], a[104], b[80], a[121], b[8], a[8], b[124], a[158], b[165], a[105], b[49], a[135], b[155], a[84], b[40], a[151], b[5], a[82], b[139], a[90], b[106], a[87], b[37], a[27], b[65], a[14], b[46], a[50], b[126], a[175], b[35], a[179], b[73], a[7], b[68], a[2], b[86], a[146], b[94], a[59], b[62], a[173], b[24], a[146], b[181], a[16], b[126], a[48], b[65], a[3], b[121], a[166], b[154], a[71], b[76], a[90], b[117], a[28], b[41], a[173], b[5], a[148], b[46], a[88], b[17], a[23], b[174], a[31], b[115], a[166], b[59], a[159], b[35], a[85], b[125], a[176], b[94], a[116], b[86], a[165], b[42], a[55], b[7], a[145], b[40], a[79], b[173], a[181], b[179], a[79], b[128], a[13], b[72], a[134], b[116], a[161], b[97],

при этом $k_{w11}=k_{11}(W_{11})=(1,12,3,13,11,9)(2,4).$

При переходе к стандартному алфавиту шифрованное сообщение примет вид:

"," K, b, c, P, r, 6, 'з', 'з', 9, K, P, Q, 'T', λ, H, v, 'И', Г, 'д', t, o, B, R, y, 'Е', 'ы', c, 'о', П, 'У', β, ", 'Г', "-, k, 'ж', f, 'б', x, χ, F, 'Б', 'Я', _ , 'ш', χ, "=", 'р', β, 'С', c, v, 6, Σ, Z, i, n, B, 2, Ъ, K, _ , 'д', ω, П, z, 'с', 'ч', ", 'я', 0, Σ, 'Б', Λ, 'Г', w, α, ";, F, 1, x, P, 'Л', 'Ш', 'ж', φ, 'И', q, _ , "=", "-, q, δ, 'н', j, κ, 1, N, I

2. Далее пользователь]1,1[вычисляет

$h_{23}^o=\varphi(k_{11}(W_{11})) \cdot h_{23}=(1,3,8,4,12,5,6)(7,9,10),$ и передает пользователю]2,3[ключ расшифрования $(h_{23}^o)^{-1}.$

3. После чего происходит шифрование базы W_{23} по правилу $h_{23}^o W_{23}=\tilde{W}_{23} \cdot k(W_{23})^o$, где $\tilde{W}_{23}$

a[89], b[170], a[87], b[24], a[167], b[70], a[69], b[87], a[45], b[83], a[92], b[37], a[179], b[116], a[139], b[87], a[44], b[8], a[126], b[32], a[139], b[96], a[161], b[95], a[93], b[144], a[45], b[137], a[91], b[32], a[34], b[97], a[46], b[11], a[109], b[161], a[181], b[51], a[64], b[75], a[25], b[68], a[10], b[13], a[36], b[15], a[6], b[20], a[109], b[136], a[31], b[127], a[92], b[149], a[7], b[90], a[26], b[70], a[176], b[46], a[27], b[148], a[87], b[157], a[161], b[8], a[123], b[53], a[157], b[21], a[158], b[94], a[11], b[134], a[176], b[110], a[87], b[25], a[158], b[52], a[74], b[136], a[39], b[164], a[140], b[18], a[22], b[105], a[138], b[178], a[121], b[173], a[6], b[152], a[34], b[34], a[106], b[17],

при этом $k(W_{23})^o=k_{23}^o(W_{23})=(1,10,14,11,2,5,13,3,12,4,9).$

В символах примет вид:

A, X, y, 'ш', T, h, g, y, O, u, D, 'Е', "-, 1, o, y, 'Н', 'з', β, 'А', o, H, N, G, E, v, O, v, C, 'А', 'В', I, П, 'л', U, N, "=", 'Ф', b, m, 'ш', f, κ, 'н', 'Д', 'п', e, 'ф', U, μ, 'я', γ, D, Λ, 'ж', B, ъ, h, ";, П, 'ы', ω, y, I, N, 'з', 8, 'Ц', I, 'x', K, F, 'л', κ, ";, V, y, 'ш', K, 'X', I, μ, 'З', П, π, 'т', 'ц', Q, ξ, "?" , 6, _ , e, Δ, 'В', 'В', R, 'с'

4. Пользователи]1,1[и]2,3[могут вычислить

$h_{35}^o=\varphi(k_{23}^o(W_{23})) \cdot h_{35}=(1,12,5,10,8,11,6,9,4,7,3),$

и]2,3[передает]3,5[ключ $(h_{35}^o)^{-1}.$

5. Осуществляется шифрование базы W_{35} по правилу $h_{35}^o W_{35}=\tilde{W}_{35} \cdot k(W_{35})^o$, где $\tilde{W}_{35}$

a[157], b[4], a[57], b[122], a[102], b[47], a[175], b[57], a[73], b[75], a[176], b[109], a[113], b[155], a[95], b[88], a[48], b[171], a[37], b[68], a[79], b[33], a[74], b[45], a[109], b[18], a[11], b[126], a[1], b[97], a[156], b[28], a[115], b[127], a[89], b[140], a[124], b[132], a[87], b[78], a[110], b[62], a[11], b[33], a[42], b[52], a[73], b[145], a[134], b[48], a[97], b[95], a[174], b[178], a[179], b[162], a[91], b[5], a[44], b[143], a[18], b[147], a[173], b[132], a[158], b[170], a[22], b[137], a[65], b[104], a[95], b[103], a[94], b[50], a[64], b[38], a[146], b[77], a[136], b[3], a[34], b[109], a[58], b[102],

при этом $k(W_{35})^o=k_{35}^o(W_{35})=(1,14,4,3)(2,9,8,12,10,11,13,5).$

В символах примет вид:

I, r, Ъ, 7, N, 'Р', ", " , Ъ, k, m, ";, U, Y, H, G, z, 'С', Ψ, 'Е', f, q, 'Б', I, O, U, 'т', 'л', β, 'а', I, Θ, ъ, 0, γ, A, π, 9, 0, y, p, V, 'Я', 'л', 'Б', 'Л', 'X', k, φ, κ, 'С', I, G, ", " , "?" , "-, Ξ, C, 'д', 'Н', τ, 'т', ψ, _ , θ, K, X, 'ц', v, c, P, G, O, F, 'У', b, 'Ж', χ, o, μ, v, 'В', U, 'Б', N

Процедура дешифрования каждой из баз $\tilde{W}_{11}$, $\tilde{W}_{23}$ и $\tilde{W}_{35}$ осуществляется аналогичным образом, при этом в качестве множителя используются $(h_{11})^{-1}$, $(h_{23}^o)^{-1}$ и $(h_{35}^o)^{-1}$ соответственно.

При изменении одного из символов базы W_{35} , например, третьего слева (a[122]), $\tilde{W}_{35}$ отличается от результатов пункта 5 на 92.86% (всего символов 84, количество точных совпадений на тех же позициях в слове – 6), при этом $k_{w35}^o=k_{35}^o(W_{35})=(1,10,12,3,2,5,13)$

$(8,14)(9,11)$, и $(k^o_{w35})^{-1}$ не равняется $(k^o_{w35})^{-1}$. Таким образом, формируемый справа остаток мультипликативной редукции может быть использован для контроля целостности данных базы. Любая подмена или потеря символов неизбежно искажает как само содержимое базы, так и контрольную сумму, вычисляемую в виде некоторой хэш-функции от полученного остатка.

Заключение

В ходе проведенного исследования решена актуальная научно-техническая задача разработки и математического обоснования криптографического метода организации многоуровневого иерархического доступа к пространственно-временным данным в графовых базах. Предложенный подход основывается на интеграции классической схемы иерархического распределения экспонент Акла-Тейлора и аппарата комбинаторной теории групп – свободных произведений с объединенной подгруппой, развивая криптографические принципы шифрования геоданных, заложенные в работе [11]. При этом разработана технология сериализации элементов графа ГИС (вершин, типов связей и их атрибутов) в единую монолитную строку («алгебраическое слово») с использованием замкнутого алфавита, сформированного из представителей левых смежных классов по объединяемой подгруппе. Предложенный способ исключает избыточность

хранения и необходимость множественной дублирующей рассылки пакетов данных пользователям с различными полномочиями. Кроме того, построена математическая модель динамического разграничения доступа, реализующая концепцию направленного «просачивания» (каскадного переноса) элементов объединенной подгруппы сквозь блоки данных под действием автоморфизмов при их приведении к нормальной форме. Доказано, что пользователь, обладающий набором из постоянных элементов объединяемой подгруппы, способен дешифровать любой целевой подграф, в то время как для пользователей промежуточных уровней СУБД генерирует контекстно-зависимые ключи, открывающие нижеуровневые базы при строгой изоляции от параллельных ветвей структуры прав. Описан механизм контроля целостности графа, основанный на определении остатка мультипликативной редукции на конце расшифрованной строки. Зафиксирован ярко выраженный лавинный эффект при модификации одного символа исходного текста, подтверждающий стойкость схемы к статистическому криптоанализу, что было продемонстрировано на конкретном примере, в котором в качестве множителей выбраны знакопеременные группы A_{14} с объединяемой подгруппой A_{12} и алфавитом, состоящим из 181 символа (т.к. $A_{14} : A_{12} = 182$, при этом тривиальный смежный класс исключается).

Благодарности

Автор благодарит ведущего инженера отдела геодезии ППК Роскадастр Дергилёву А.Э. за ценные советы при написании статьи, а также за помощь в проведении экспериментов и обработке данных.

Список литературы

1. Akl S.G., Taylor P.D. Cryptographic Solution to a Problem of Access Control in a Hierarchy. ACM Transactions on Computer Systems. 1983. Vol. 1. No. 3. Pp. 239-248. DOI: 10.1145/357369.357372.
2. Damiani M.L., Bertino E., Catania B., Perlasca P. GEO-RBAC: A spatially aware role-based access control model. ACM Transactions on Information and System Security (TISSEC). 2007. Vol. 10. No. 1. Art. 2. DOI: 10.1145/1210263.1210265.
3. Rodríguez-Aragón J.F., Zato C., Pinto-Santos F., Sánchez-Pravos L. KATENA: a verifiable governance architecture for encrypted cloud storage systems. Frontiers in Big Data. 2026. Vol. 9. Art. 1829960. DOI: 10.3389/fdata.2026.1829960.
4. Saxena U.R., Khatri Y., Kadel R., Shailendra S. A Service Recommendation Model in Cloud Environment Based on Trusted Graph-Based Collaborative Filtering Recommender System. Network. 2025. Vol. 5. No. 3. Art. 30. DOI: 10.3390/network5030030.
5. Celikbilek I., Celiktas B., Ozdemir E. A Hierarchical Key Assignment Scheme: A Unified Approach for Scalability and Efficiency. IEEE Access. 2024. Vol. 12. Pp. 70568-70580. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3401844.
6. Lee T. F., Wang J. G., Chen Y. C. Review of hierarchical database access control for E-medicine systems. Tzu Chi Medical Journal. 2023. Vol. 35. No. 2. Pp. 143-147. DOI: 10.4103/tcmj.tcmj_124_22.
7. Lal S., Kumar N. An efficient flexible hierarchical access control scheme enabling real-life exceptions. Sādhana. 2022. Vol. 47. Art. 20. DOI: 10.1007/s12046-021-01776-0.
8. Магнус В., Каррас А., Солигэр Д. Комбинаторная теория групп / Пер. с англ. Д.И. Молдаванского, А.А. Фридмана, Ю.И. Хмелевского; Под ред. М.Д. Гриндлингера. М.: Наука. 1974. 456 с.
9. Neumann P.M. (1973). The SQ-universality of some finitely presented groups. Journal of the Australian Mathematical Society, 16 (1). 1-6. DOI:10.1017/S1446788700013859.
10. Лоссов К.И. SQ-универсальность свободных произведений с конечными объединенными подгруппами // Сибирский математический журнал. 1986. Т. 27. №6. С. 128-139.
11. Лоссов К.И., Дергилёва А.Э. Защита потоков геоданных с использованием амальгам групп в качестве платформы шифрования // Геодезия и картография. 2026. №6. С. 24-32. DOI: 10.22389/0016-7126-2026-1032-6-24-32.

References

1. Akl S.G., Taylor P.D. Cryptographic Solution to a Problem of Access Control in a Hierarchy. ACM Transactions on Computer Systems. 1983. Vol. 1. No. 3. Pp. 239-248. DOI: 10.1145/357369.357372.
2. Damiani M.L., Bertino E., Catania B., Perlasca P. GEO-RBAC: A spatially aware role-based access control model. ACM Transactions on Information and System Security (TISSEC). 2007. Vol. 10. No. 1. Art. 2. DOI: 10.1145/1210263.1210265.
3. Rodríguez-Aragón J.F., Zato C., Pinto-Santos F., Sánchez-Pravos L. KATENA: a verifiable governance architecture for encrypted cloud storage systems. Frontiers in Big Data. 2026. Vol. 9. Art. 1829960. DOI: 10.3389/fdata.2026.1829960.

4. Saxena U.R., Khatri Y., Kadel R., Shailendra S. A Service Recommendation Model in Cloud Environment Based on Trusted Graph-Based Collaborative Filtering Recommender System. *Network*. 2025. Vol. 5. No. 3. Art. 30. DOI: 10.3390/network5030030.
5. Celikbilek I., Celikbas B., Ozdemir E. A Hierarchical Key Assignment Scheme: A Unified Approach for Scalability and Efficiency. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. Pp. 70568-70580. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3401844.
6. Lee T. F., Wang J. G., Chen Y. C. Review of hierarchical database access control for E-medicine systems. *Tzu Chi Medical Journal*. 2023. Vol. 35. No. 2. Pp. 143-147. DOI: 10.4103/tcmj.tcmj_124_22.
7. Lal S., Kumar N. An efficient flexible hierarchical access control scheme enabling real-life exceptions. *Sādhana*. 2022. Vol. 47. Art. 20. DOI: 10.1007/s12046-021-01776-0.
8. Magnus V., Karras A., Soliter D. *Kombinatornaya teoriya grupp* [Combinatorial group theory]. Translated from English by D.I. Moldavansky, A.A. Fridman, and Yu.I. Khmelevsky; edited by M.D. Grindlinger. Moscow: Nauka. 1974. 456 p.
9. Neumann P.M. (1973). The SQ-universality of some finitely presented groups. *Journal of the Australian Mathematical Society*, 16 (1). 1-6. DOI:10.1017/S1446788700013859.
10. Lossov K.I. SQ-universality of free products with finite amalgamated subgroups. *Sibirskii matematicheskii zhurnal*. 1986. V. 27. No. 6. Pp. 128-139.
11. Lossov K.I., Dergileva A.E. Protection of Geodata Streams Using Group Amalgams as an Encryption Platform. *Geodeziya i kartografiya*. 2026. No. 6. Pp. 24-32. DOI: 10.22389/0016-7126-2026-1032-6-24-32.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Лоссов Константин Иванович

кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой Высшей математики, ФГБОУ ВО Московский государственный университет геодезии и картографии, 105064, Москва, Россия

Information about authors
Affiliations

Lossov Konstantin Ivanovich

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, the Chief of the Chair of Higher Mathematics, Moscow State University of Geodesy and Cartography, 105064, Moscow, Russia

Поступила в редакцию 26.08.2026 г.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В МОНИТОРИНГЕ МЕЛИОРИРОВАННЫХ АГРОЛАНДШАФТОВ: АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ДЛЯ РИСОВЫХ СИСТЕМ ЮГА РОССИИ

Шаповалов Д.А., Джалилов М.Б., Лукьянова Т.С., Груздев В.С., Хуторова А.О.

Государственный университет по землеустройству, 105064, Москва, Россия

e-mail: shapoval_ecology@mail.ru

В статье рассматриваются возможности применения технологий дистанционного зондирования Земли для мониторинга мелиорированных агроландшафтов рисовых систем юга России на примере Краснодарского края. Показано, что существующая система статистической отчетности обеспечивает оценку масштабов рисоводства, параметров мелиоративного фонда и водопользования, однако не позволяет выявлять пространственную неоднородность состояния оросительных систем и локализовать проблемные участки. На основе сопоставления агрегированных статистических данных за 2020-2025 гг. и современных научных подходов к использованию спутниковых, радиолокационных и БПЛА-данных обоснована необходимость перехода к пространственно детализированному мониторингу. Подтверждается гипотеза о том, что технологии дистанционного зондирования позволяют выявлять локальные особенности водного режима, вегетации и деградационных процессов, не отражаемые в традиционной отчетности. Определены основные направления интеграции ДЗЗ и геоинформационных технологий в систему управления рисовыми оросительными системами, включая картирование фактических посевных площадей, мониторинг режимов затопления и выявление аномалий состояния агроландшафтов. Показано, что использование мультисенсорного подхода формирует основу для повышения эффективности водопользования и устойчивости мелиорированных земель.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, рисоводство, мелиорированные земли, оросительные системы, Краснодарский край, агроландшафты, мониторинг, водный режим, БПЛА, спутниковые данные, геоинформационные системы, пространственная неоднородность.

MODERN REMOTE SENSING TECHNOLOGIES FOR MONITORING RECLAIMED AGRICULTURAL LANDSCAPES: AN ANALYSIS OF CAPABILITIES FOR RICE-GROWING SYSTEMS IN SOUTHERN RUSSIA

Shapovalov D.A., Jalilov M.B., Lukyanova T.S., Gruzdev V.S., Khutorova A.O.

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

This article examines the potential of Earth remote sensing technologies for monitoring reclaimed agricultural landscapes within rice irrigation systems in southern Russia, using Krasnodar Krai as a case study. It demonstrates that while the existing statistical reporting system allows for the assessment of rice cultivation scale, land reclamation infrastructure parameters, and water usage, it fails to identify the spatial heterogeneity of irrigation system conditions or pinpoint specific problem areas. By comparing aggregated statistical data from 2020-2025 with modern scientific approaches utilizing satellite, radar, and UAV data, the study substantiates the need to transition to spatially detailed monitoring. The hypothesis is confirmed that remote sensing technologies can detect local variations in water regimes, vegetation dynamics, and land degradation processes that are not captured in traditional reporting. Key directions for integrating remote sensing and geoinformation technologies into rice irrigation management systems are identified, including mapping actual sown areas, monitoring flooding regimes, and detecting anomalies in the condition of agricultural landscapes. The study demonstrates that a multi-sensor approach provides a foundation for improving water use efficiency and the sustainability of reclaimed lands.

Keywords: Earth remote sensing, rice farming, reclaimed lands, irrigation systems, Krasnodar Krai, agricultural landscapes, monitoring, water regime, UAVs, satellite data, geographic information systems, spatial heterogeneity.

Рисоводство в южной части России представляет собой особый тип аграрного производства, в котором результат определяется не только агротехникой, но и состоянием гидротехнической инфраструктуры, режимом подачи воды, уровнем эксплуатационной дисциплины на оросительной сети и экологическим состоянием почвенного покрова. В российской структуре производства риса ведущая роль принадлежит Краснодарскому краю, который по официальным и отраслевым данным, формирует основную часть национального сбора этой культуры и остается ключевой территорией для оценки

устойчивости отечественного рисоводства [1-5].

Специфика рисовых систем как объекта мониторинга заключается в сочетании трех обстоятельств. Во-первых, это агроландшафт с развитой гидротехнической инфраструктурой, где геометрия чеков, распределителей, сбросной сети и защитных дамб определяет продуктивность не меньше, чем свойства сорта. Во-вторых, для риса критично наличие фазы затопления, из-за чего объект наблюдения нельзя адекватно описывать только как «посев»; фактически мониторингу подлежит сложная система «вода – почва – растение – гидротехническая

сеть». В-третьих, именно рисовые системы особенно остро демонстрируют разрыв между масштабной региональной статистикой и потребностями управления на уровне отдельных оросительных систем, хозяйств и чеков. Годовые итоги по краю не отвечают на вопрос, в каком конкретно массиве, хозяйстве или чеке возникли дефицит воды, переувлажнение, нарушение сроков затопления, неравномерность вегетации или признаки засоления [6-15].

В этой связи выдвигается следующая гипотеза исследования: предполагается, что применение технологий дистанционного зондирования Земли позволяет выявлять пространственную неоднородность состояния мелиорированных агроландшафтов рисовых систем юга России, не отражаемую в традиционной статистической отчетности, что создает предпосылки для повышения эффективности управления водным режимом и использования земельных ресурсов.

Проверка данной гипотезы в статье осуществляется путем сопоставления агрегированных статистических показателей рисоводства и мелиорации с аналитическими возможностями современных спутниковых, радиолокационных и БПЛА-технологий.

Сопоставимый ряд производственных показателей по рису для Краснодарского края демонстрирует, что в 2020-2025 гг. отрасль развивалась неравномерно. В 2020 г. посевная площадь риса составляла 126.6 тыс. га, валовой сбор – 840.1 тыс. т, урожайность – 66.4 ц/га; в 2022 г. произошел резкий спад до 92.3 тыс. га и 582.6 тыс. т при урожайности 63.5 ц/га; в 2023-2025 гг. наблюдалось восста-

новление площадей и валового сбора. При этом 2024-2025 гг. в открытых источниках представлены неполностью сопоставимыми наборами данных: часть публикаций использует показатели в весе после доработки, часть – в бункерном весе, а по 2025 г. открытые абсолютные значения валового сбора и урожайности носят оперативный характер [1-5].

Из годовых данных невозможно установить, какие именно оросительные системы понесли наибольшие потери, где были сорваны сроки затопления, какие чеки выпали из оборота полностью, а какие – частично. Между тем для управления рисовыми системами именно это и является предметом оперативного решения. Тем самым уже этот блок статистики подтверждает необходимость перехода от региональных годовых итогов к пространственно развернутому мониторингу [1-5].

В 2020-2025 гг. общая площадь мелиорированных земель выросла с 410.95 до 420.95 тыс. га, однако земли, фактически используемые для орошения, составляли лишь 283-291 тыс. га, а площадь фактического полива – 123.879-156.051 тыс. га. Иными словами, один и тот же регион имеет как минимум три разные геометрии: инфраструктурную, используемую и реально политую. Годовая статистика фиксирует каждую из них в суммарном виде, но не отвечает на вопрос, какие конкретно участки входят в разрывы между этими множествами [6-11].

Данные таблицы 2 показывают, что если доля риса от общей площади мелиорированных земель колеблется в пределах 22.5-30.8%, то доля риса в землях, фактически используемых для орошения, достигает 32.6-44.1%. Это означает, что даже без

Таблица 1

Динамика основных показателей рисоводства в Краснодарском крае в 2020-2025 гг.

Год	Посевная площадь риса, тыс. га	Валовый сбор, тыс. т	Урожайность, ц/га
2020	126.6	840.1	66.4
2021	118.1	745.2	64.3
2022	92.3	582.6	63.5
2023	110.1	714.8	65.7
2024	117.4	828.2	73.2
2025	116.0	829.6	73.1

Таблица 2

Мелиоративный фонд и фактическое использование земель в Краснодарском крае в 2020-2025 гг.

Год	Площадь мелиорированных земель, тыс. га	Земли, фактически используемые для орошения, тыс. га	Из них фактически полито, тыс. га	Доля риса в мелиорированных землях, %	Доля риса в землях, фактически используемых для орошения, %
2020	410.95	287.39	156.05	30.8	44.1
2021	410.92	291.50	147.76	28.7	40.5
2022	410.92	283.24	123.88	22.5	32.6
2023	416.37	289.93	138.11	26.4	38.0
2024	418.00	289.66	146.60	28.1	40.5
2025	420.95	291.34	149.74	27.6	39.8

учета конкретной конфигурации оросительных систем рис выступает как системообразующий потребитель водно-мелиоративной инфраструктуры. Однако статистика по-прежнему остается нечувствительной к локальному недоиспользованию или недополиву: известно только, что на уровне края часть земель фактически не вошла в поливной контур года, но неизвестно, где именно возник этот разрыв [6-11].

В официальных карточках ФГБУ «Управление «Кубаньмелиоводхоз» опубликован годовой объем забираемой воды из различных водных объектов для орошения. В 2020-2025 гг. он находился в диапазоне 2.76-3.01 млрд м³. Если сопоставить эти значения с расчетной сезонной потребностью риса при средней оросительной норме 18.74 тыс. м³/га, получается, что одна только рисовая отрасль теоретически требует 1.73-2.37 млрд м³ за сезон, то есть в отдельные годы 58-86% общего водозабора для целей орошения [6-13].

Оценочная сезонная потребность риса в воде (W_p) рассчитана по формуле $W_p = S_p \times N_p$, где S_p – посевная площадь риса, тыс. га; N_p – средняя оросительная норма риса, принятая по профильной мелиоративной литературе как многолетний ориентир для условий Кубани. Расчет носит оценочный характер и используется для сопоставления водной нагрузки рисоводства с общим объемом водозабора на орошение.

Данные таблицы 3 свидетельствуют о том, что рис в регионе – не просто одна из культур на орошаемых землях, а главный организующий фактор водопользования всего мелиоративного комплекса. Но при всей информативности такого вывода он все равно остается агрегированным. Годовой водозабор не раскрывает, каким образом вода распределялась между системами, где возникли позднесезонные дефициты, какие массивы получили избыточное увлажнение, а какие – недополив. Именно это и образует следующую аналитическую границу стати-

стики [6-13].

Существенным ограничением существующей информационной базы является отсутствие открытого сопоставимого годового ряда по засоленным, заболоченным и иным деградированным рисовым землям Краснодарского края. В доступных публикациях представлены либо научные оценки длительных почвенно-мелиоративных ограничений, либо оперативные сообщения об отдельных стрессовых событиях, таких как подтопление чеков, аварии гидротехнических сооружений и дефицит влаги. В результате статистическая отчетность позволяет оценить масштаб отрасли и общую динамику ее функционирования, но не дает возможности локализовать проблемные массивы и проследить их состояние во времени. Именно это усиливает значимость технологий дистанционного зондирования Земли в системе мониторинга рисовых оросительных систем [14;15;22-25].

Технологические возможности дистанционного зондирования для рисовых систем

Современные исследования показывают, что наиболее результативным для мониторинга рисовых агроландшафтов является многовременной и мультисенсорный подход, сочетающий оптические, радиолокационные и БПЛА-данные. Оптическая съемка позволяет выделять контуры посевов и отслеживать динамику вегетации, радиолокационная – фиксировать затопление и работать в условиях облачности, а БПЛА – детализировать состояние отдельных чеков и элементов гидротехнической сети [16;19-21].

Для рисовых систем юга России такой подход особенно важен, поскольку диагностическое значение имеет не только состояние растительного покрова, но и режим затопления. Региональные исследования, выполненные для Краснодарского края, подтверждают возможность применения геоинформационных технологий и данных дистанционного зондирования для картирования состояния рисовых

Таблица 3

Водозабор для орошения и оценочная сезонная потребность риса в воде в Краснодарском крае

Год	Объем водозабора для орошения, млн м ³	Средняя оросительная норма риса, тыс. м ³ /га	Оценка сезонной потребности риса, млн м ³	Доля оценочной потребности риса в общем водозаборе, %
2020	2757.84	18.74	2372.5	86
2021	2985.8	18.74	2213.2	74.1
2022	2985.8	18.74	1729.7	57.9
2023	2985.8	18.74	2063.3	69.1
2024	3013.55	18.74	2200.1	73
2025	3007.56	18.74	2173.8	72.3

посевов и прогноза урожайности [17;18].

Обсуждение: как ДЗЗ закрывает дефициты официальной статистики

Сопоставление статистических данных и научной литературы показывает, что действующая отчетность позволяет оценить масштаб рисоводства, параметры мелиоративного фонда и общий объем водопользования, однако не дает информации о пространственной неоднородности состояния мелиорированных земель. Именно в этой части технологии ДЗЗ обладают наибольшим потенциалом, поскольку позволяют перейти от годовых итогов по региону к наблюдению за состоянием конкретных оросительных систем, полей и чеков [16-21].

На региональном уровне ДЗЗ может использоваться для ежегодного картирования фактически занятых рисом площадей; на уровне оросительной системы – для контроля сроков затопления и выявления участков с нарушенным водным режимом; на уровне хозяйства и поля – для детального обследования с применением БПЛА и наземной валидации. Такой подход делает возможным более обоснованное управление водным режимом и использованием земельных ресурсов в рисовых системах юга России [16-21]. С практической точки зрения наиболее перспективной для юга России представляется следующая последовательность работ:

1. ежегодное обновление маски фактических рисовых чеков на основе многовременных спутниковых данных;
2. мониторинг начала затопления, продолжительности удержания воды и сроков сброса;
3. построение временных рядов индексов состояния посевов по каждому полю и чеку;
4. автоматизированное выделение аномалий, требующих приоритетного обследования;
5. детальное БПЛА-обследование проблемных массивов с последующей наземной проверкой водного режима, солевого состояния почв и технического состояния гидросети [16-21].

Заключение

Проведенный анализ показывает, что официальная статистика по Краснодарскому краю за 2020-2025 гг. позволяет вполне надежно оценить масштаб рисоводства, параметры мелиоративного фонда и водную нагрузку на региональный агроландшафт. За этот период посевная площадь риса колебалась от 92.3 до 126.6 тыс. га, общая площадь

мелиорированных земель – от 410.95 до 420.95 тыс. га, а объем водозабора для орошения – от 2.76 до 3.01 млрд м³. Уже эти величины показывают, что рисовые системы Кубани остаются одним из наиболее ресурсоемких и управленчески сложных сегментов мелиорированного земледелия России [1-13].

Одновременно установлено, что открытая статистическая отчетность не обеспечивает пространственной локализации ключевых проблем. Она фиксирует площадь фактического полива, но не выявляет конкретные недополиваемые чеки; отражает общий водозабор, но не показывает распределение воды по системам; подтверждает наличие острых событий, но не дает их пространственной конфигурации; а по хроническим деградационным процессам – в первую очередь засолению и заболачиванию рисовых земель – вообще не формирует открытого годового ряда в детализации, достаточной для оперативного управления [6-15; 22-25].

Тем самым рабочая гипотеза статьи получает подтверждение: существующая статистика достаточна для макрооценки, но недостаточна для адресного управления мелиорированными агроландшафтами. Наиболее адекватным ответом на этот дефицит выступает интеграция ДЗЗ и ГИС, основанная на совместном использовании многовременных оптических и радиолокационных спутниковых данных, БПЛА-мониторинга и наземной валидации. Для рисовых систем юга России это означает переход от учета «по краю за год» к диагностике фактического использования чеков, режимов затопления, аномалий вегетации, рисков вторичного засоления и зон водного стресса на уровнях оросительной системы, хозяйства и поля [16-21].

Практическое значение полученных результатов состоит в том, что они позволяют обосновать архитектуру цифрового мониторинга рисовых систем Кубани и других орошаемых территорий юга России. Приоритетными направлениями следует считать: картирование фактических рисовых площадей, картирование водного режима чеков, выявление устойчивых зон деградации и интеграцию дистанционных данных с инженерной и почвенно-мелиоративной информацией. Именно в этой логике технологии ДЗЗ могут стать не вспомогательным, а системообразующим элементом управления мелиорированными агроландшафтами.

Список литературы

1. Краснодарстат. Итоги уборки урожая 2022 года в Краснодарском крае [Электронный ресурс]. 2023. 6 марта. Дата обращения: 02.05.2026.
2. Огорева Ю.А. Пути повышения эффективности отечественного рисоводства (по материалам Краснодарского края): дис. ... канд. экон. наук. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина. 2025. 188 с.
3. Министерство сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Краснодарского края. На Кубани урожай риса в 2024 году превысил 860 тысяч тонн [Электронный ресурс]. 2024. 25 октября. Дата обращения: 02.05.2026.
4. Краснодарстат. Посевные площади сельскохозяйственных культур под урожай 2025 года в хозяйствах всех категорий Краснодарского края [Электронный ресурс]. 2025. 8 августа. Дата обращения: 02.05.2026.

5. Законодательное Собрание Краснодарского края. Кубанские рисоводы готовятся к посевной кампании [Электронный ресурс]. 2025. 15 апреля. Дата обращения: 02.05.2026.
6. ФГБУ «Управление «Кубаньмелиоводхоз». Наличие мелиорированных земель в субъекте Российской Федерации за 2020 год [Электронный ресурс]. Дата обращения: 02.05.2026.
7. ФГБУ «Управление «Кубаньмелиоводхоз». Наличие мелиорированных земель в субъекте Российской Федерации за 2021 год [Электронный ресурс]. Дата обращения: 02.05.2026.
8. ФГБУ «Управление «Кубаньмелиоводхоз». Наличие мелиорированных земель в субъекте Российской Федерации за 2022 год [Электронный ресурс]. Дата обращения: 02.05.2026.
9. ФГБУ «Управление «Кубаньмелиоводхоз». Наличие мелиорированных земель в субъекте Российской Федерации за 2023 год [Электронный ресурс]. Дата обращения: 02.05.2026.
10. ФГБУ «Управление «Кубаньмелиоводхоз». Наличие мелиорированных земель в субъекте Российской Федерации за 2024 год [Электронный ресурс]. Дата обращения: 02.05.2026.
11. ФГБУ «Управление «Кубаньмелиоводхоз». Наличие мелиорированных земель в субъекте Российской Федерации за 2025 год [Электронный ресурс]. Дата обращения: 02.05.2026.
12. Владимиров С.А. Парадигма сбалансированного водопотребления при эксплуатации рисовых оросительных систем в Краснодарском крае // Рисоводство. 2019. №3(44).
13. Малышева Н.Н., Якуба С.Н. Развитие мелиорации на Кубани и рациональное водопользование при орошении риса // Рисоводство. 2017. №4(37).
14. Ткачева М.С., Досеева О.А. К вопросу солеустойчивости риса (обзор) // Научный журнал КубГАУ. 2015. №105(01). Статья 57.
15. Слюсарев В.Н., Осипов А.В., Тешева С.А., Суминский И.И. Антропогенное воздействие на состав и свойства почв рисовых агроценозов дельты реки Кубани // Рисоводство. 2021. №4(53). С. 43-47.
16. Козенко К.Ю., Комарова О.П. Вегетационные индексы и методы дистанционного зондирования агроландшафтов как фундамент развития прецизионного орошения // Орошаемое земледелие. 2021. №2(33). С. 63-66. DOI: 10.35809/2618-8279-2021-2-9.
17. Васильев С.М., Митяева Л.А. Мониторинг орошаемого агроландшафта с учетом калибровки данных дистанционного зондирования в рамках геоинформационных технологий // Научный журнал КубГАУ. 2017. №131. С. 217-232.
18. Garkusha S., Skazhennik M., Petrushin A. et al. Research of rice crops in Krasnodar region by remote sensing data. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 175. Article 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/202017501004.
19. Fang H., Liang S., Chen Y. et al. A comprehensive review of rice mapping from satellite data: Algorithms, product characteristics and consistency assessment. Science of Remote Sensing. 2024. Vol. 10. Art. 100172. DOI: 10.1016/j.srs.2024.100172.
20. Fernández-Urrutia M., Arbelo M., Gil A. Identification of Paddy Croplands and Its Stages Using Remote Sensors: A Systematic Review. Sensors. 2023. Vol. 23. No. 15. Article 6932.
21. Singha M., Dong J., Zhang G., Xiao X. Identifying floods and flood-affected paddy rice fields in Bangladesh based on Sentinel-1 imagery and Google Earth Engine. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2020. Vol. 166. Pp. 278-293.
22. ФГБУ «Россельхозцентр» по Краснодарскому краю. Рисоводам края поставлены задачи по проведению уборочной кампании 2024 г. [Электронный ресурс]. 2024. 29 августа. Дата обращения: 02.05.2026.
23. РБК Краснодар. На Кубани потери рисовых чеков из-за подтоплений превысили 2 тыс. га [Электронный ресурс]. 2021. 8 октября. Дата обращения: 02.05.2026.
24. РБК Краснодар. Что кубанские аграрии говорят про запрет экспорта риса [Электронный ресурс]. 2022. 31 мая. Дата обращения: 02.05.2026.
25. Interfax. Кубанские рисоводы встревожены дефицитом влаги в почве [Электронный ресурс]. 2025. 28 марта. Дата обращения: 02.05.2026.

References

1. Krasnodarstat. Results of the 2022 harvest in Krasnodar Krai [Electronic resource]. March 6, 2023. Accessed: May 2, 2026.
2. Ogoreva Yu.A. *Puti povysheniya effektivnosti otechestvennogo risovodstva (po materialam Krasnodarskogo kraja)* [Ways to improve the efficiency of domestic rice farming (based on data from Krasnodar Krai)]. Dissertation for the degree of Candidate of Economic Sciences. Krasnodar: I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University. 2025. 188 p.
3. Ministry of Agriculture and Processing Industry of Krasnodar Krai. Rice harvest in Kuban exceeded 860,000 tons in 2024 [Electronic resource]. October 25, 2024. Accessed: May 2, 2026.
4. Krasnodarstat. Sown areas of agricultural crops for the 2025 harvest in farms of all categories in Krasnodar Krai [Electronic resource]. August 8, 2025. Accessed: May 2, 2026.
5. Legislative Assembly of Krasnodar Krai. Kuban rice growers prepare for the sowing campaign [Electronic resource]. April 15, 2025. Accessed: May 2, 2026.
6. FSBI «Kubanmeliovodkhoz» Administration. Availability of reclaimed lands in the constituent entity of the Russian Federation for 2020 [Electronic resource]. Accessed: May 2, 2026.
7. FSBI «Kubanmeliovodkhoz» Administration. Availability of reclaimed lands in the constituent entity of the Russian Federation for 2021 [Electronic resource]. Accessed: May 2, 2026.
8. FSBI «Kubanmeliovodkhoz» Administration. Availability of reclaimed lands in the constituent entity of the Russian Federation for 2022 [Electronic resource]. Accessed: 02.05.2026.
9. FSBI «Kubanmeliovodkhoz Administration». Availability of reclaimed lands in the constituent entity of the Russian Federation for 2023 [Electronic resource]. Accessed: 02.05.2026.
10. FSBI «Kubanmeliovodkhoz Administration». Availability of reclaimed lands in the constituent entity of the Russian Federation for 2024 [Electronic resource]. Accessed: 02.05.2026.
11. FSBI «Kubanmeliovodkhoz Administration». Availability of reclaimed lands in the constituent entity of the Russian Federation for 2025 [Electronic resource]. Accessed: 02.05.2026.
12. Vladimirov S.A. Paradigm of balanced water consumption during the operation of rice irrigation systems in Krasnodar Krai. *Risovodstvo*. 2019. No. 3(44).
13. Malysheva N.N., Yakuba S.N. Development of land reclamation in the Kuban region and rational water use in rice irrigation. *Risovodstvo*. 2017. No. 4(37).

14. Tkacheva M. S., Doseeva O. A. On the issue of rice salt tolerance (review). *Nauchnyy zhurnal KubGAU*. 2015. No. 105(01). Article 57.
15. Slyusarev V.N., Osipov A.V., Tesheva S.A., Suminsky I.I. Anthropogenic impact on the composition and properties of soils in rice agrocenoses of the Kuban River delta. *Risovodstvo*. 2021. No. 4(53). Pp. 43-47.
16. Kozenko K. Yu., Komarova O. P. Vegetation indices and remote sensing methods for agricultural landscapes as a foundation for the development of precision irrigation. *Oroshayemoye zemledeliye*. 2021. No. 2(33). Pp. 63-66. DOI: 10.35809/2618-8279-2021-2-9.
17. Vasiliev S. M., Mityaeva L. A. Monitoring of irrigated agricultural landscapes incorporating remote sensing data calibration within the framework of geoinformation technologies. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*. 2017. No. 131. Pp. 217-232.
18. Garkusha S., Skazhennik M., Petrushin A. et al. Research of rice crops in Krasnodar region by remote sensing data. E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 175. Article 01004. DOI: 10.1051/e3sconf/202017501004.
19. Fang H., Liang S., Chen Y. et al. A comprehensive review of rice mapping from satellite data: Algorithms, product characteristics and consistency assessment. *Science of Remote Sensing*. 2024. Vol. 10. Art. 100172. DOI: 10.1016/j.srs.2024.100172.
20. Fernández-Urrutia M., Arbelo M., Gil A. Identification of Paddy Croplands and Its Stages Using Remote Sensors: A Systematic Review. *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 15. Article 6932.
21. Singha M., Dong J., Zhang G., Xiao X. Identifying floods and flood-affected paddy rice fields in Bangladesh based on Sentinel-1 imagery and Google Earth Engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. Vol. 166. Pp. 278-293.
22. FSBI «Rosselkhoztsentr» (Krasnodar Territory Branch). Tasks set for the region's rice growers regarding the 2024 harvest campaign [Electronic resource]. 2024. August 29. Accessed: May 2, 2026.
23. RBC Krasnodar. Rice paddy losses due to flooding in the Kuban region exceed 2,000 hectares [Electronic resource]. 2021. October 8. Accessed: May 2, 2026.
24. RBC Krasnodar. What Kuban farmers say about the rice export ban [Electronic resource]. 2022. May 31. Accessed: May 2, 2026.
25. Interfax. Kuban rice growers concerned about soil moisture deficit [Electronic resource]. 2025. March 28. Accessed: May 2, 2026.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Шаповалов Дмитрий Анатольевич

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству», 105064, Москва, Россия

Джалилов Марат Бакирович

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

Лукьянова Татьяна Семеновна

доктор географических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству», 105064, Москва, Россия

Груздев Владимир Станиславович

доктор географических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет по землеустройству», 105064, Москва, Россия

Хуторова Алла Олеговна

кандидат географических наук, доцент, «ФГБОУ ВО Государственный университет по землеустройству», 105064, Москва, Россия

Information about authors
Affiliations

Shapovalov Dmitry Anatolyevich

Doctor of Technical Sciences, Professor, State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Dzhalilov Marat Bakirovich

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

Lukyanova Tatyana Semenovna

Doctor of Geographical Sciences, Professor, State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Gruzdev Vladimir Stanislavovich

Doctor of Geographical Sciences, Professor, State University of Land Use Planning, 105064, Moscow, Russia

Khutorova Alla Olegovna

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

Поступила в редакцию 10.08.2026 г.

ВЛИЯНИЕ УТЕЧЕК И МЕЖКОНТУРНЫХ ПЕРЕТОКОВ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЕГО СОСТОЯНИЯ

Литвиненко А.А., Ваньков Ю.В.

Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, Россия

e-mail: annaannaaver@gmail.com

В работе рассмотрено влияние утечек теплоносителя во внешнюю среду и межконтурных перетоков на температурные характеристики теплообменного аппарата. Для оценки изменения температур теплоносителей на выходе и температурного напора разработаны модели в Aspen HYSYS для случаев утечки греющего и нагреваемого теплоносителей, а также перетока греющего теплоносителя в нагреваемый и нагреваемого теплоносителя в греющий, экспериментальная проверка выполнена на разработанном стенде для случая утечки греющего теплоносителя. Установлено, что утечка греющего теплоносителя приводит к снижению температур обоих теплоносителей на выходе и температурного напора; утечка нагреваемого теплоносителя – к увеличению выходных температур при снижении температурного напора; межконтурные перетоки – к снижению температуры греющей среды, увеличению температуры нагреваемой среды и снижению температурного напора. Экспериментальные результаты подтвердили направление изменения температур и температурного напора при утечке греющего теплоносителя. Полученные закономерности могут быть использованы при разработке алгоритма системы диагностики технического состояния теплообменных аппаратов и способствовать переходу от регламентного ремонта к ремонту по фактическому состоянию.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, температурный напор, температура, диагностика.

EFFECT OF LEAKS AND INTER-CIRCUIT CROSS-LEAKAGE ON THE THERMAL CHARACTERISTICS OF A HEAT EXCHANGER FOR CONDITION DIAGNOSTICS

Litvinenko A.A., Vankov Yu.V.

Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

The study examines the effect of heat-transfer fluid leakage into the environment and inter-circuit cross-leakage on the thermal characteristics of a heat exchanger. To evaluate changes in the outlet temperatures of the heat-transfer fluids and in the temperature difference, Aspen HYSYS models were developed for hot-side and cold-side leakage, as well as for hot-to-cold and cold-to-hot inter-circuit cross-leakage. Experimental verification was carried out on the developed test rig for the case of hot-side leakage. It was established that hot-side leakage leads to a decrease in the outlet temperatures of both heat-transfer fluids and in the temperature difference; cold-side leakage leads to an increase in the outlet temperatures while the temperature difference decreases; inter-circuit cross-leakage leads to a decrease in the hot-side temperature, an increase in the cold-side temperature, and a decrease in the temperature difference. The experimental results confirmed the direction of changes in the temperatures and in the temperature difference in the case of hot-side leakage. The identified regularities can be used in the development of an algorithm for a heat exchanger condition diagnostic system and can support the transition from scheduled maintenance to condition-based maintenance.

Keywords: heat exchanger, temperature head, log mean temperature difference, diagnostics.

Введение

Повышение энергоэффективности и надежности работы тепломеханического оборудования является одной из ключевых задач современной теплоэнергетики и промышленности. Теплообменные аппараты (ТОА) применяются в системах отопления, вентиляции и кондиционирования зданий, в котельных и тепловых сетях, химических и нефтеперерабатывающих производствах, металлургии, а также в пищевой и фармацевтической промышленности. Эксплуатация ТОА сопровождается образованием различных отложений на теплообменной поверхности, которые создают дополнительное термическое сопротивление, что ведет к снижению общего коэффициента теплопередачи, уменьшению проходного сечения и увеличению гидравлического сопротивления [1,2], а также могут наблюдаться

утечки теплоносителя в окружающую среду или переток из одного контура в другой [3-5]. Эффективность работы ТОА напрямую определяет общий КПД установки, удельный расход топлива и, как следствие, эксплуатационные затраты. В условиях роста тарифов на энергоносители и ужесточения экологических норм даже незначительное ухудшение характеристик ТОА приводит к существенным финансовым потерям для предприятия [6].

Широкое распространение ТОА в промышленности, наличие проблем технического состояния при эксплуатации требуют проведения их своевременной диагностики.

Рассмотрим современные методы диагностики ТОА. *Акустические методы* неразрушающего контроля базируются на анализе и обработке механических волн, возникающих в объекте контроля [7,8].

Визуальные методы предусматривают диагностику с применением видеоскопов [9]. *Системы с использованием многофункциональных вихревых приборов-дефектоскопов* [10] позволяют оценивать внутреннее утонение стенки в процентном соотношении, степень закупорки трубок, диаметр и размер дефекта, а также расстояние до него. Такие дефектоскопы работают на основе электромагнитной индукции.

В настоящее время известно применение *искусственного интеллекта (ИИ)* для диагностики ТОА. В работах [11,12] рассматривается использование ИИ для прогнозирования технического обслуживания оборудования. Отдельную группу составляют *параметрические методы диагностики*. В работах [13-15] для диагностики технического состояния теплообменных аппаратов используются эксплуатационные параметры, прежде всего температуры входящих и выходящих потоков. Текущие значения сравниваются с эталонными, а выявленные отклонения используются для обнаружения загрязнений, утечек и снижения эффективности теплообмена.

Перспективным направлением является непрерывная *параметрическая диагностика* в реальном времени, авторами [16,17] предлагается проводить диагностику по тепловым и гидравлическим характеристикам, преимуществом такого подхода является возможность использования уже развернутой приборной базы, поскольку датчики температуры и давления, как правило, присутствуют в стандартной обвязке ТОА. Это минимизирует затраты на внедрение системы и повышает ее практическую значимость.

Цель работы заключается в установлении закономерностей изменения температур на выходе и среднелогарифмического температурного напора (ТН) при утечках теплоносителя и межконтурных перетоках путем разработки моделей в Aspen HYSYS и их экспериментального подтверждения на примере утечки греющей среды.

Научная значимость работы заключается в установлении закономерностей изменения температур на выходе и ТН ТОА при наличии утечек теплоносителя во внешнюю среду и межконтурных потоков.

Практическая значимость: результаты данной работы могут быть использованы при разработке алгоритма системы диагностики технического состояния ТОА. Внедрение такой системы позволит перейти от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию, что увеличивает межремонтный пробег оборудования.

Материалы и методы

Данная работа является продолжением исследования [18] по оценке влияния эксплуатационных неисправностей на ТН и температуры на выходе греющей и нагреваемой среды.

Для получения данных по ТН и температурам на выходе разработаны модели в Aspen HYSYS V12, характеризующие утечку греющей среды (рис. 1а), утечку нагреваемой среды (рис. 1б), переток греющей среды в нагреваемую (рис. 2а), переток нагреваемой среды в греющую (рис. 2б). Для имитации наличия утечки теплообменник разделен на две части, сумма тепловой нагрузки разделенного теплообменника равна тепловой нагрузке исходного аппарата. Элемент «тройник» разделяет основной поток среды на два потока, первый – в атмосферу (имитируя утечку), второй продолжает движение по основному каналу к выходу теплообменника. Для имитации перетока теплоносителя между контурами использованы элементы «тройник» и «смеситель». С помощью элемента «тройник» часть потока одного теплоносителя отводится из основного канала и направляется в элемент «смеситель», где осуществляется его подмес к потоку другого теплоносителя. Для расчета модели использовались следующие исходные данные: теплообменный аппарат ТТР-27-10 производителя «Завод Термосистемы», количество пластин – 10, площадь теплообмена 0.25 м²; температура на входе греющего теплоносителя – 50°C, температура на входе нагреваемого теплоносителя – 45°C, расход греющего теплоносителя – 0.26 кг/с, расход нагреваемого теплоносителя – 0.29 кг/с, коэффициент теплопередачи – 3500 Вт/(м²·°C), удельная теплоемкость теплоносителей – 4190 Дж/кг·°C.

С целью экспериментального подтверждения направления изменения ТН и температур на выходе разработан стенд, на котором проведены эксперименты по получению эталонных значений теплообменного аппарата при его нормальной работе и при утечке греющей среды. На рис. 3а, 3б представлена принципиальная схема и внешний вид стенда.

Описание стенда: циркуляционным насосом 4а греющий теплоноситель подается в электрический водогрейный котел 1 для нагрева, из котла теплоноситель направляется в теплообменник 2, отдает тепло нагреваемому контуру и движется к насосу 4а. Циркуляционным насосом 4б нагреваемый теплоноситель подается в теплообменник 2, нагревается за счет теплоносителя греющего контура, затем направляется в радиатор с вентилятором 3 для охлаждения и движется к циркуляционному насосу 4б. Датчики давления ПД100-ДИ0.4-181-0.5, температуры ДТС054-РТ1000.В3.60/2.Г1/2 и расходомеры Asarps подключены к модулю расширения ПРМ-24.3 и программируемому реле ПР205-24.1211.06.2.0. Все параметры отображаются на экране программируемого реле и дублируются по каналу Ethernet в облачное хранилище Owen Cloud.

Результаты и Обсуждение

Для оценки влияния места утечки/перетока на выходные параметры теплообменника были рассмотрены три варианта координаты: $x=0.05$ м

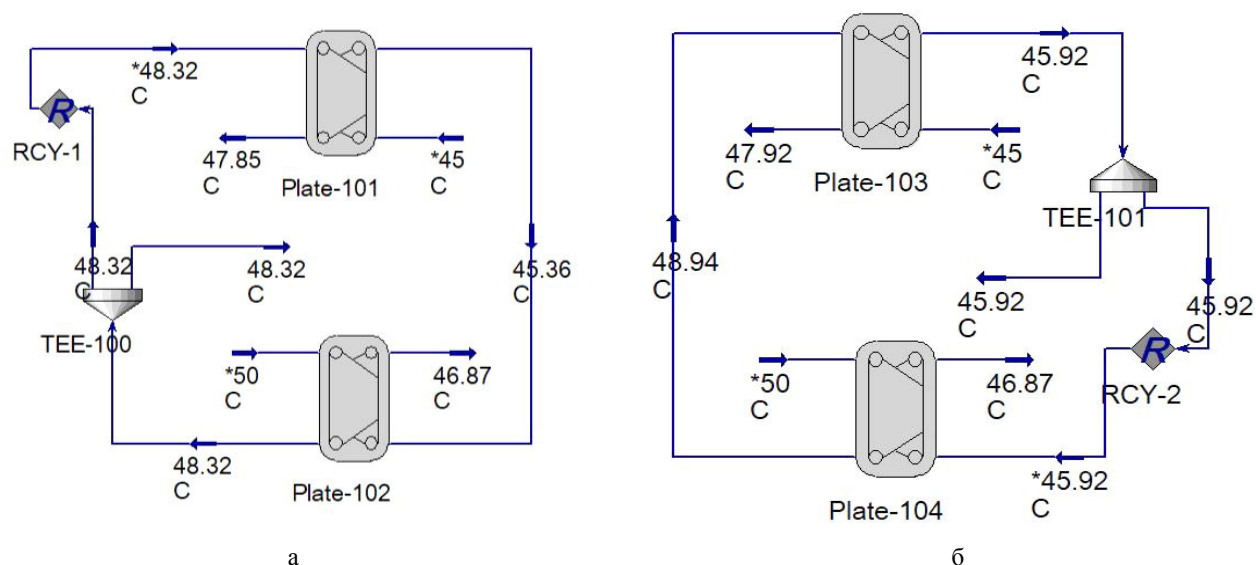


Рис. 1а, б. Модель теплообменного аппарата, характеризующая утечку греющего (слева) и нагреваемого (справа) теплоносителя

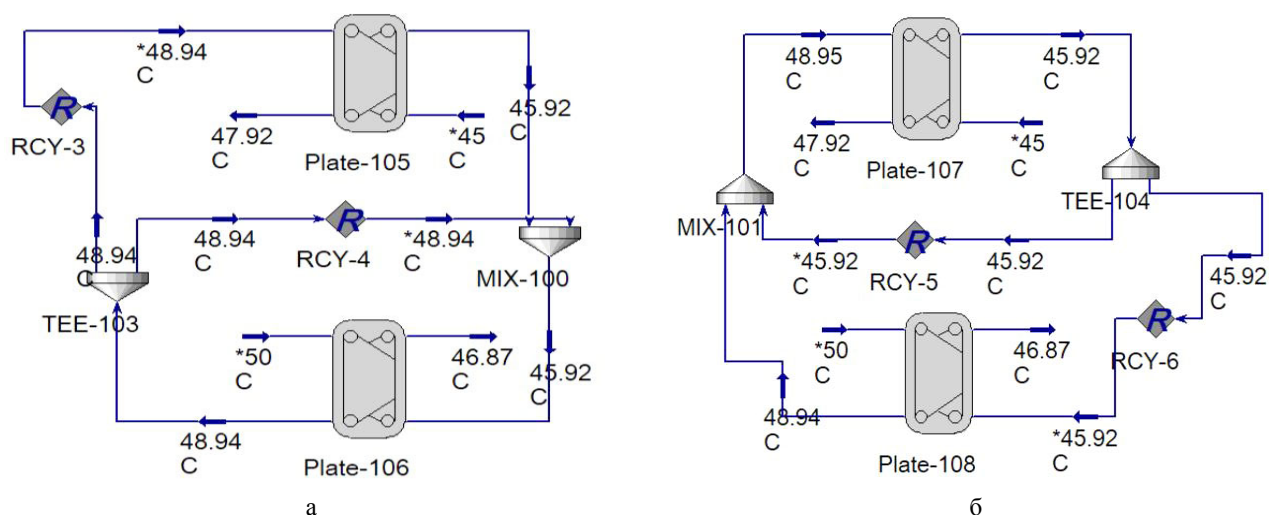


Рис. 2а, б. Модель теплообменного аппарата, характеризующая переток греющего теплоносителя в нагреваемый (слева) и нагреваемого теплоносителя в греющий (справа)

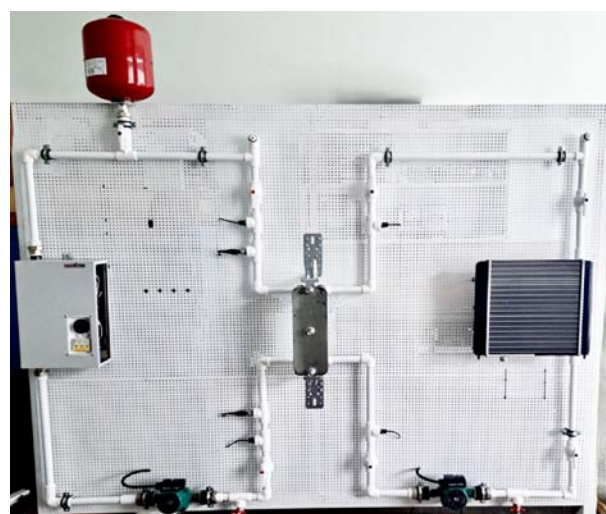
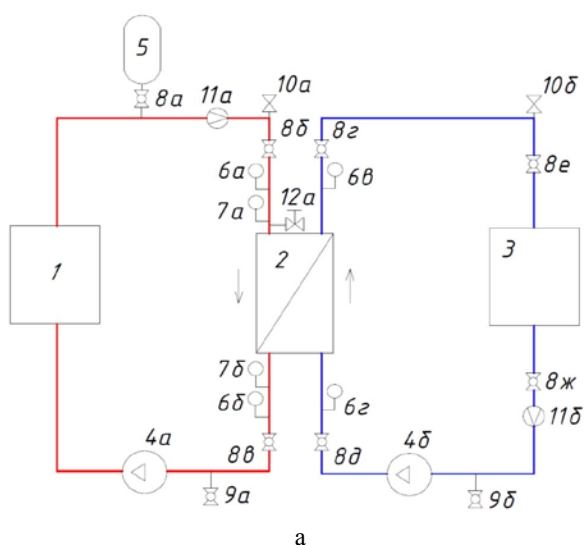


Рис. 3а, б. Принципиальная схема и внешний вид стенда: 1 – котел; 2 – теплообменный аппарат; 3 – радиатор охлаждения с вентилятором; 4а, 4б – циркуляционные насосы; 5 – расширительный бак; 6а, 6б, 6в, 6г – датчики температуры; 7а, 7б – датчики давления; 8а, 8б, 8в, 8г, 8е, 8ж – кран шаровой Ду25; 9а, 9б – кран шаровой Ду15; 10а, 10б – кран Маевского; 11а, 11б – расходомеры; 12а – клапан регулирующий

(соответствует утечке/перетоку теплоносителя ближе к входу); $x=0.13$ м (соответствует утечке/перетоку теплоносителя посередине); $x=0.21$ м (соответствует утечке/перетоку теплоносителя ближе к выходу). Моделирование выполнялось для доли утечки и перетока 1%, 3%, 5%. На рис. 4 представлен график изменения температуры на выходе греющего теплоносителя, на рис. 5 – график изменения температу-

ры на выходе нагреваемого теплоносителя, на рис. 6 – график изменения ТН. На графиках показаны результаты моделирования в Aspen HYSYS для следующих случаев: нормальная работа теплообменного аппарата, утечка греющей среды, утечка нагреваемой среды, переток греющей среды в нагреваемую, переток нагреваемой среды в греющую. Установлено, что чем ближе к входу среды находится дефект,

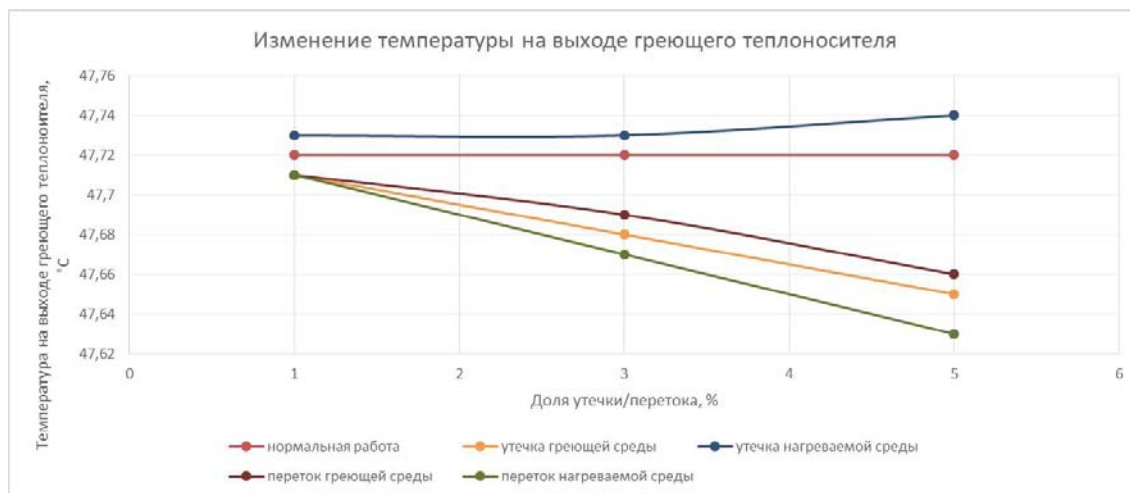


Рис. 4. Изменение температуры на выходе греющего теплоносителя

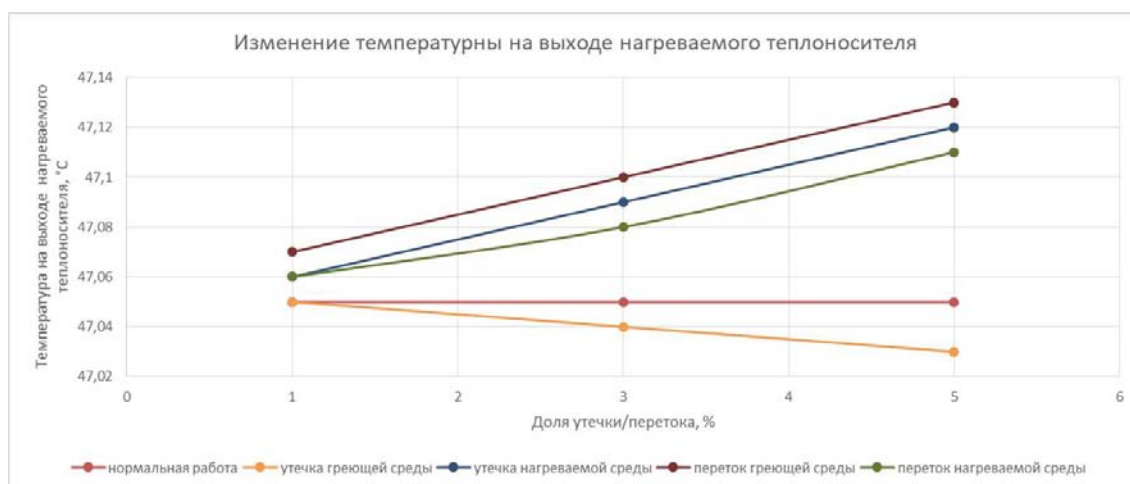


Рис. 5. Изменение температуры на выходе нагреваемого теплоносителя

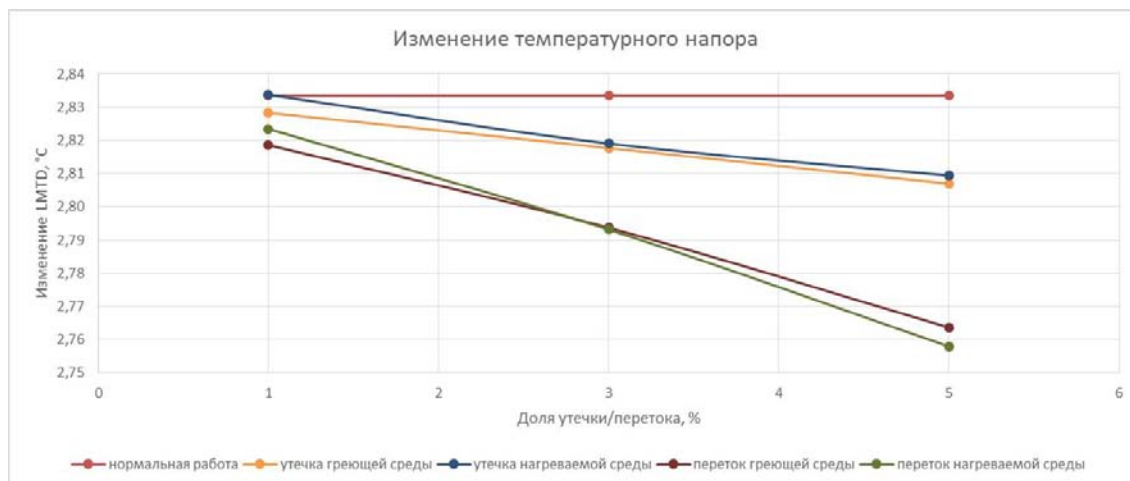


Рис. 6. Изменение температурного напора

тем сильнее он оказывает влияние на выходные параметры, поэтому на графиках приведены данные утечки или межконтурного перетока, соответствующие входу теплоносителя.

Утечка греющего теплоносителя приводит к снижению температур обоих теплоносителей на выходе и ТН. При увеличении доли утечки до 5% температура греющей среды на выходе снижается на 0.07°C , температура нагреваемой среды – на 0.02°C , а температурный напор – на 0.02°C . Утечка нагреваемого теплоносителя приводит к увеличению температур обоих теплоносителей на выходе и уменьшению ТН. При увеличении доли утечки до 5% температура нагреваемой среды на выходе увеличивается на 0.07°C , температура греющей среды – на 0.02°C , а температурный напор – на 0.02°C . При перетоке греющего теплоносителя в нагреваемый наблюдается разнонаправленное изменение выходных температур: температура греющей среды снижается, а нагреваемой – возрастает. При перетоке 5% изменения составляют соответственно 0.06°C и 0.08°C , одновременно температурный напор уменьшается на 0.07°C . При перетоке нагреваемого теплоносителя в греющий температура греющей среды на выходе снижается, тогда как температура нагреваемой среды на выходе возрастает. При увеличении доли перетока до 5% изменения составляют 0.09°C и 0.07°C , соответственно. Температурный напор уменьшается на 0.07°C .

На первом этапе экспериментальной части были проведены серии опытов в исправном состоянии теплообменного аппарата. По экспериментальным данным был определен эксплуатационный коэффициент теплопередачи $K=3593 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C})$. Коэффициент определялся по тепловому потоку, принятому как среднее значение тепловых потоков греющей и нагреваемой сред.

На втором этапе проводились эксперименты с имитацией утечки греющего теплоносителя. Для этого непосредственно перед входом в теплообменный аппарат в греющий контур был установлен регулирующий клапан, через который осуществлялся отбор части теплоносителя (на рис. 3а обозначен как

12а). Для определения массового расхода утечки теплоноситель трижды собирали в емкость в течение 1 мин; массу собранного теплоносителя определяли взвешиванием. Исследованы три уровня утечки – 1.782%; 3.062% и 3.562%, которым соответствовали средние массовые расходы утечки 0.293 кг/мин; 0.520 кг/мин и 0.603 кг/мин. Для каждого уровня выполнено по три независимых эксперимента. Для исключения влияния различий входных режимных параметров для каждого экспериментального режима дополнительно рассчитывался соответствующий эталон исправного состояния при фактических значениях входных температур и расходов. Далее при тех же входных условиях моделировалась утечка греющей среды, после чего расчетные значения выходных температур и ТН сопоставлялись с экспериментальными данными.

В таблице 1 представлены данные по ТН (в диапазоне $50\text{--}52^{\circ}\text{C}$) по трем сериям экспериментов, для оценки воспроизводимости эталонных значений определены среднее арифметическое $\bar{X}$, среднее квадратическое отклонение S , СКО среднего арифметического S_x , критерии Граббса $G_{\max}$, $G_{\min}$ и теоретическое значение G_m , доверительная граница случайной погрешности ε [19].

На рис. 7 представлено сравнение ТН при нормальной работе и при утечке горячего теплоносителя, синим обозначены точки, характеризующие эталонное значение ТН, красным – значение ТН при утечке, вертикальные отрезки отражают доверительные границы случайной погрешности среднего значения.

Анализ показал, что возникновение утечки греющего теплоносителя приводит к снижению ТН теплообменного аппарата. При увеличении доли утечки от 1.782 до 3.562% экспериментальное снижение ТН возрастает от 0.012°C до 0.017°C , что соответствует относительному изменению от 0.519% до 0.768%. Аналогичная закономерность получена при математическом моделировании: расчетное снижение ТН составляет от 0.01°C до 0.019°C , или 0.444 – 0.843%. Максимальное различие между расчетным и экспериментальным изменением температурного

Таблица 1

Значения температурного напора, полученные в ходе эксперимента с утечкой греющей среды

Серия экспериментов	Номер эксперимента	ТН ($50\text{--}52^{\circ}\text{C}$)	Доля утечки, %	$\bar{X}$	S	S_x	$G_{\max}$	$G_{\min}$	G_r	ε
1	1	2.25								
1	2	2.246	1.782	2.248	0.002	0.001	0.801	1.121	1.155	0.005
1	3	2.249								
2	1	2.218								
2	2	2.221	3.062	2.219	0.002	0.001	1.121	0.801	1.155	0.005
2	3	2.217								
3	1	2.259								
3	2	2.258	3.562	2.256	0.005	0.003	0.676	1.149	1.155	0.012
3	3	2.25								

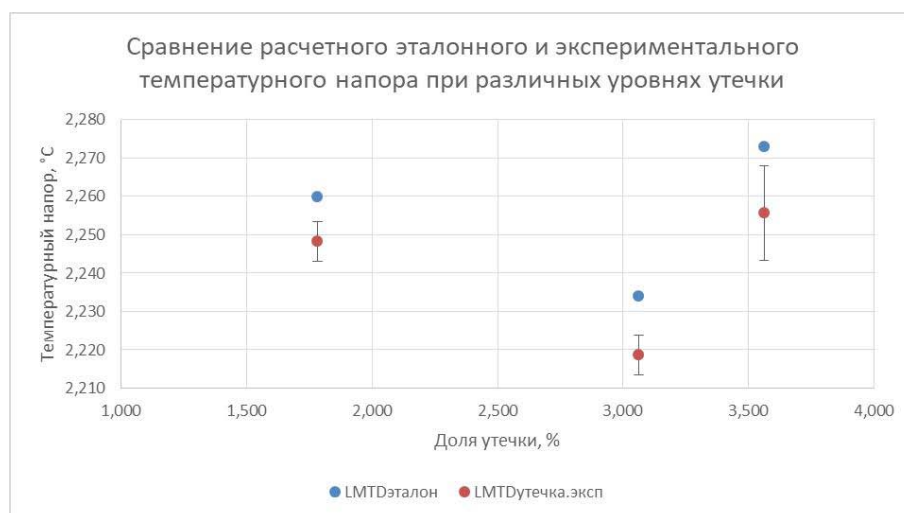


Рис. 7. Сравнение расчетного эталонного и экспериментального температурного напора при различных уровнях утечки

напора не превышает 0.002°C. Таким образом, экспериментальные данные подтверждают установленную моделью закономерность снижения ТН при утечке греющего теплоносителя.

Аналогично, были проанализированы выходные температуры греющей и нагреваемой среды, экспериментальные исследования подтвердили направление изменения температур на выходе, установленное моделированием. При увеличении утечки греющего теплоносителя во всех исследованных режимах наблюдалось снижение температуры греющей среды на выходе T_2 и температуры нагреваемой среды на выходе T_4 . Для утечек 1.782-3.562% экспериментальные изменения T_2 составили от -0.080°C до -0.117 °C, а T_4 – от -0.061 до -0.093°C. Таким образом, направление изменения выходных температур соответствует признакам, полученным в работе [18], при моделировании в Aspen HYSYS и в ходе эксперимента.

Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями выходных температур T_2 и T_4 обусловлено различием между условиями математической модели и реального экспериментального стенда. В математической модели принимается идеальный тепловой баланс теплообменного аппарата, при котором тепловой поток, отдаваемый греющим теплоносителем, полностью передается нагреваемой среде: $Q_1=Q_2$. В экспериментальных условиях данное равенство выполняется не полностью: расхождение теплового баланса составляло порядка 5-8%. Это связано с наличием тепловых потерь в окружающую среду через теплообменный аппарат и трубопроводы, тепловой инерционностью элементов стенда. При этом как математическое модели-

рование, так и эксперимент показывают снижение температур T_2 и T_4 при увеличении утечки греющего теплоносителя.

Заключение или Выводы

Разработанная модель в Aspen HYSYS позволила установить характерные направления изменения выходных температур и температурного напора при утечках и межконтурных перетоках. При утечке греющей среды снижаются температуры обоих теплоносителей на выходе; при утечке нагреваемой среды выходные температуры увеличиваются, для межконтурных перетоков независимо от направления перетока характерно снижение температуры греющей среды на выходе, увеличение температуры нагреваемой среды на выходе. Для всех рассмотренных случаев температурный напор уменьшается относительно значения, полученного при нормальной работе теплообменника.

Экспериментальная проверка для утечки греющего теплоносителя подтвердила расчетное направление изменения температурных параметров. При увеличении доли утечки от 1.782% до 3.562% экспериментальное снижение температурного напора составило 0.012-0.017°C (0.519-0.768%), а расчетное – 0.010-0.019°C (0.444-0.843%).

Сочетания направлений изменения выходных температур и температурного напора могут использоваться как диагностические признаки для различения внешней утечки и межконтурного перетока. Полученные экспериментальные и расчетные результаты использованы при разработке алгоритма системы диагностики технического состояния ТОА [16,17].

Список литературы

1. Елистратова Ю.В., Семенов А.С., Уваров В.А., Щербинина О.А. Экономический аспект диагностики накипеобразующих слоев в пластинчатых теплообменниках // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. №5. 2023. С. 42-51. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-42-51.
2. Тарасенко Н.В. Влияние отложений накипи на надежность и эффективность работы теплообменного оборудования / Тарасенко Н.В., Гунько И.В., Родионова Т.В. // НАУКА И ИННОВАЦИИ В XXI ВЕКЕ: АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ, ОТКРЫТИЯ И ДОСТИЖЕНИЯ сборник статей IX Международной научно-практической конференции. 2018. С. 24-26.

3. Thekkuden D.T., Mourad A.H.I., Bouzid A.H. Failures and leak inspection techniques of tube-to-tubesheet joints: A review. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 130. 105798. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105798.
4. Shu L., Zhu X., Huang X., Zhou Z., Zhang Y., Wang X. A Review of Research on Acoustic Detection of Heat Exchanger Tube. *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*. 2015. 2(5). e5. DOI: 10.4108/eai.17-9-2015.150287.
5. Mansour M., Khalifa W. Leaking of 316L stainless steel heat exchanger tubes in carbon dioxide process, *Scientific Reports*. 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-21376-w.
6. Минко В.А. Влияние отложений на рабочих поверхностях системы отопления на показатели работы элементов системы / Минко В.А., Семенов А.С., Гулько И.В., Елистратова Ю.В. // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. №5. 2014. С.32-35.
7. Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В. Контроль отложений на поверхностях теплообменного оборудования методом свободных колебаний // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2024. 26(4):55-64. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-4-55-64>.
8. Гарнышова Е.В., Измайлова Е.В., Ваньков Ю.В. Оценка толщины отложений на внутренней поверхности теплообмена по затуханию собственных колебаний // *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. 2020. 22(4):106-114. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-106-114>.
9. Интернет-ресурс: https://prokontrol.ru/works/kontrol_teploobmennikov_i_ekonomajzerov/.
10. Интернет-ресурс: <http://galasndt.ru/index.php?id=207&ysclid=ly8eoqxli304842528>.
11. da Silva, Samuel & Fuzaro de Almeida, Estênio & Godoy, Vitória. (2025). Transfer Learning of Digital Shadows for Fouling Monitoring in Heat Exchangers. DOI: 10.13140/RG.2.2.18842.96963.
12. Lodhi, Shahrulkh Khan & Hussain, Hafiz Khawar & Hussain, Ibrar. (2024). Using AI to Increase Heat Exchanger Efficiency: An Extensive Analysis of Innovations and Uses. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Arts*. 3. 1-14. DOI:10.47709/ijmdsa.v3i4.4617.
13. Пат. 2771269, Российская Федерация, Способ автоматической диагностики состояния рекуперативных теплообменников на установках низкотемпературной сепарации газа, эксплуатируемых на севере РФ / Ефимов А.Н. Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Газпром добыча Ямбург», № 2021107549, заявл. 22.03.2021, опубл. 29.04.2022.
14. Демин А.М., Науменко А.П. Диагностирование теплообменного оборудования на основе режимных параметров установки гидроочистки дизельных топлив // *Омский научный вестник*. №4. 2019. С. 85.
15. Интернет-источник: <https://dynamicsru.com/news/heat-exchanger-monitoring/>.
16. Пат. №2808982. Российская Федерация, Способ автоматической диагностики наличия отложений на стенках рекуперативного теплообменного аппарата / Аверьянова А.А., АО «Научно-исследовательский и конструкторский институт центробежных и роторных компрессоров им. В.Б. Шнеппа». №2808982. опубл. 05.12.2023.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025693197 Российская Федерация. Автоматическая система диагностики технического состояния рекуперативного теплообменного аппарата: заявлено 14.11.2025: опубликовано 26.11.2025 / Литвиненко А.А.; правообладатель Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторский институт центробежных и роторных компрессоров им. В.Б. Шнеппа».
18. A.A. Litvinenko, Y.V. Vankov and A.R. Timershin. «Theoretical Study of the Effects of Off-Design Conditions Induced by Deposits, Coolant Leaks, and Cross-Leaks on Heat Exchanger Performance». 2026 8th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, Russian Federation. 2026. Pp. 1-6. DOI: 10.1109/REEPE69046.2026.11481262.
19. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Введ. 2011-12-01. М.: Стандартинформ. 2011. 20 с.

References

1. Elistratova Yu.V., Seminenko A.S., Uvarov V.A., Shcherbinina O.A. The economic aspect of diagnostics of scale-forming layers in plate heat exchangers. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. No. 5. 2023. Pp. 42-51. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-5-42-51.
2. Tarasenko N.V., Gunko I.V., Rodionova T.V. *Vliyaniye otlozheniy nakipi na nadezhnost' i effektivnost' raboty teploobmennogo oborudovaniya* [The influence of scale deposits on the reliability and efficiency of heat exchange equipment]. *SCIENCE AND INNOVATION IN THE 21st CENTURY: CURRENT ISSUES, DISCOVERIES AND ACHIEVEMENTS* Collection of articles of the IX International Scientific and Practical Conference. 2018. Pp. 24-26.
3. Thekkuden D.T., Mourad A.H.I., Bouzid A.H. Failures and leak inspection techniques of tube-to-tubesheet joints: A review. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 130. 105798. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105798.
4. Shu L., Zhu X., Huang X., Zhou Z., Zhang Y., Wang X. A Review of Research on Acoustic Detection of Heat Exchanger Tube. *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*. 2015. 2(5). e5. DOI: 10.4108/eai.17-9-2015.150287.
5. Mansour M., Khalifa W. Leaking of 316L stainless steel heat exchanger tubes in carbon dioxide process, *Scientific Reports*. 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-21376-w.
6. Minko V.A., Seminenko A.S., Gunko I.V., Elistratova Yu.V. The influence of deposits on the working surfaces of the heating system on the performance of the system elements. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. No. 5. 2014. Pp. 32-35.
7. Garnyshova E.V., Izmaylova E.V. Control of deposits on pipeline systems by the method of free oscillations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2024. 26(4):55-64. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2024-26-4-55-64>.
8. Garnyshova E.V., Izmaylova E.V., Vankov Yu.V. Deposit thickness control of the heat exchange equipment by hardware and software complex. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2020. 22(4):106-114. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2020-22-4-106-114>.
9. Internet resource: https://prokontrol.ru/works/kontrol_teploobmennikov_i_ekonomajzerov/.
10. Internet resource: <http://galasndt.ru/index.php?id=207&ysclid=ly8eoqxli304842528>.
11. da Silva, Samuel & Fuzaro de Almeida, Estênio & Godoy, Vitória. (2025). Transfer Learning of Digital Shadows for Fouling Monitoring in Heat Exchangers. DOI: 10.13140/RG.2.2.18842.96963.
12. Lodhi, Shahrulkh Khan & Hussain, Hafiz Khawar & Hussain, Ibrar. (2024). Using AI to Increase Heat Exchanger Efficiency: An Extensive Analysis of Innovations and Uses. *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Arts*. 3. 1-14. DOI:10.47709/ijmdsa.v3i4.4617.
13. Pat. 2771269, Russian Federation, A method for automatically diagnosing the condition of regenerative heat exchangers at low-temperature gas separation plants operated in the north of the Russian Federation. Efimov A.N. Patent Holder Gazprom Dobycha Yamburg Limited Liability Company, No. 2021107549, application no. 03.22.2021, published 04.29.2022.

14. Demin A.M., Naumenko A.P. Diagnostics of heat exchange equipment based on the operating parameters of a diesel fuel hydrotreating unit. *Omskiy nauchnyy vestnik*. No. 4. 2019. Pp. 85.
15. Internet resource: <https://dynamicsru.com/news/heat-exchanger-monitoring/>.
16. Patent No. 2808982, Russian Federation, A method for automatically diagnosing the presence of deposits on the walls of a regenerative heat exchanger. Averyanova A.A., V.B. Shnepp Scientific Research and Design Institute of Centrifugal and Rotary Compressors, No. 2808982, publ. 05.12.2023.
17. Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2025693197, Russian Federation. Automatic System for Diagnosing the Technical Condition of a Recuperative Heat Exchanger: Application No. 14.11.2025, Publication No. 26.11.2025. Litvinenko A.A.; Copyright Holder: Joint Stock Company «V.B. Shnepp Research and Design Institute of Centrifugal and Rotary Compressors».
18. A.A. Litvinenko, Y.V. Vankov and A.R. Timershin. «Theoretical Study of the Effects of Off-Design Conditions Induced by Deposits, Coolant Leaks, and Cross-Leaks on Heat Exchanger Performance». 2026 8th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, Russian Federation. 2026. Pp. 1-6. DOI: 10.1109/REEPE69046.2026.11481262.
19. GOST R 8.736-2011. State System for Ensuring the Uniformity of Measurements. Direct Multiple Measurements. Methods for Processing Measurement Results. General Provisions. Introduced 2011-12-01. Moscow: Standartinform, 2011. 20 p.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Литвиненко Анна Алексеевна

аспирант кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета, 420066, Казань, Россия

Ваньков Юрий Витальевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» Казанского государственного энергетического университета, 420066, Казань, Россия

Information about authors
Affiliations

Litvinenko Anna Alekseevna

Postgraduate student at the Department of Industrial Heat Power Engineering and Heating Systems at Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Vankov Yuriy Vitalyevich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial Heat Power Engineering and Heat Supply Systems at Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Поступила в редакцию 24.08.2026 г.

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, РАБОТАЮЩЕЙ В СОСТАВЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Набиуллина М.Ф., Мингалеева Г.Р.

Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, Россия

e-mail: madinanabiullina@yandex.ru

В статье рассмотрены технико-эксплуатационные характеристики создания автономных гибридных электростанций, объединяющих параболические солнечные коллекторы и котлы на растительном биотопливе, для энергоснабжения сельскохозяйственных объектов Республики Татарстан. Предложена принципиальная схема, в которой термомасляный контур гелиоустановки интегрирован с биотопливным котлом и многоступенчатой системой теплообмена для выработки перегретого пара. На основе нормативных методов расчёта определены расходы гранулированного топлива различного состава (лузга подсолнечника, солома, шелуха овса) при работе в гибридном режиме. Показано, что подключение солнечных коллекторов снижает годовой расход биотоплива на 21-33% в зависимости от его вида. Выявлено, что работа котла в гибридной схеме напрямую зависит от климатических условий региона, теплофизических и механических свойств топлива и теплоносителя. Для электростанции мощностью 500 кВт срок окупаемости составил 9 лет 8 месяцев, при этом в качестве топлива используются собственные отходы сельскохозяйственного предприятия.

Ключевые слова: гибридные электростанции, возобновляемые источники энергии, биомасса, солнечная энергия, автономное энергоснабжение.

INFLUENCE OF OPERATING CONDITIONS ON THE EFFICIENCY OF A HYBRID POWER PLANT OPERATING AS PART OF AN AGRICULTURAL ENERGY COMPLEX

Nabiullina M.F., Mingaleeva G.R.

Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

The article examines the technical and operational characteristics of creating autonomous hybrid power plants that combine parabolic solar collectors and boilers using plant-based biofuel to supply energy to agricultural facilities in the Republic of Tatarstan. A basic schematic is proposed, in which the thermal oil circuit of the solar installation is integrated with a biofuel boiler and a multi-stage heat exchange system for generating superheated steam. Based on standard calculation methods, the consumption rates of granulated fuel of various compositions (sunflower husk, straw, oat husk) during operation in hybrid mode have been determined. It has been shown that connecting solar collectors reduces the annual consumption of biofuel by 21-33%, depending on its type. It has been revealed that the operation of a boiler in a hybrid scheme directly depends on the climatic conditions of the region, as well as on the thermophysical and mechanical properties of the fuel and coolant. For a power plant with a capacity of 500 kW, the payback period was 9 years and 8 months, with the farm's own waste being used as fuel.

Keywords: hybrid power plants, renewable energy sources, biomass, solar energy, autonomous energy supply.

В настоящее время вопросы надежности и доступности энергоснабжения потребителей являются ключевыми при формировании проектов обеспечения тепловой и электрической энергией, что важно как для создания комфортных условий жизни населения, так и обеспечения конкурентоспособности предприятий, поскольку стоимость энергии существенно влияет на себестоимость производимой продукции [1].

Эта задача может быть решена путем вовлечения в топливно-энергетический баланс регионального уровня местных возобновляемых источников энергии (ВИЭ) – солнечной, ветровой, энергии биомассы.

Основным преимуществом ВИЭ является доступность и практическое отсутствие платы за их использование. Основной недостаток ВИЭ – это переменный характер потока мощности в зависимости от времени и состояния окружающей среды. Для

обеспечения резервной выработки электроэнергии может быть использована гибридная энергоустановка на биомассе для покрытия возможных несоответствий между прогнозируемыми и реальными значениями выходной мощности установок на ВИЭ [2].

Интеграция солнечных тепловых электростанций и котельных установок на биотопливе открывает перспективы для создания гибридных энергетических комплексов. Такой подход позволяет оптимизировать выработку энергии, когда солнечные концентраторы задействованы в светлое время суток и осуществляется переход на биомассу в периоды недостаточной инсоляции (ночью, в пасмурную погоду, а также в переходные временные интервалы) [3].

Существуют различные схемы гибридных электростанций на возобновляемых источниках энергии, где вспомогательным контуром служит паровой котел на биотопливе [4].

На основе анализа известных и перспективных технологических схем гибридных электростанций и методов их расчета сформирована обобщенная методика выбора типа технологической схемы и ее расчета [5]. На рисунке 1 представлен алгоритм обобщенного метода выбора технологической схемы гибридной электростанции на возобновляемых источниках энергии и ее расчета.

Тип технологической схемы в первую очередь определяется видом твердого биотоплива, которое доступно в данном регионе или стране и использование которого является наиболее целесообразным. Для сельскохозяйственных районов Республики Татарстан в качестве топлива в основном может использоваться лузга подсолнечника, стебли подсолнечника и кукурузы, шелуха гречихи, овса и дресина.

Гибридные электростанции на территории сельскохозяйственных предприятий могут работать в сочетании с солнечной энергией или ветровой энергоустановкой. Такие схемы целесообразно использовать, когда интенсивность прямого солнечного излучения превышает 1200 кВт/м^2 и скорость ветра больше 3 м/с . После того как будут определены топливо и тип технологической схемы, выбор

основного оборудования и его расчет могут быть осуществлены в соответствии с существующими методиками.

Для эффективной и надежной эксплуатации автономных энергетических установок, удаленных от централизованного энергоснабжения, целесообразно использовать местные энергетические ресурсы вместо дорогостоящего твердого и жидкого привозного топлива [1].

Цель научного исследования заключается в проведении комплексной оценки результативности функционирования гибридных электростанций, что позволит осуществить многофакторный анализ различных конфигураций интеграции возобновляемых источников энергии с котлами на твердом биотопливе.

Материалы и методы

Анализ доступных энергетических ресурсов для сельскохозяйственных предприятий Республики Татарстан показывает, что всего в республике образуется более 3.27 млн. тонн сельскохозяйственных отходов ежегодно, из них наибольшую долю составляет солома, которая в основном используется на корм и подстилки для животных. Стебли подсолнечника в основном утилизируются, закапываются

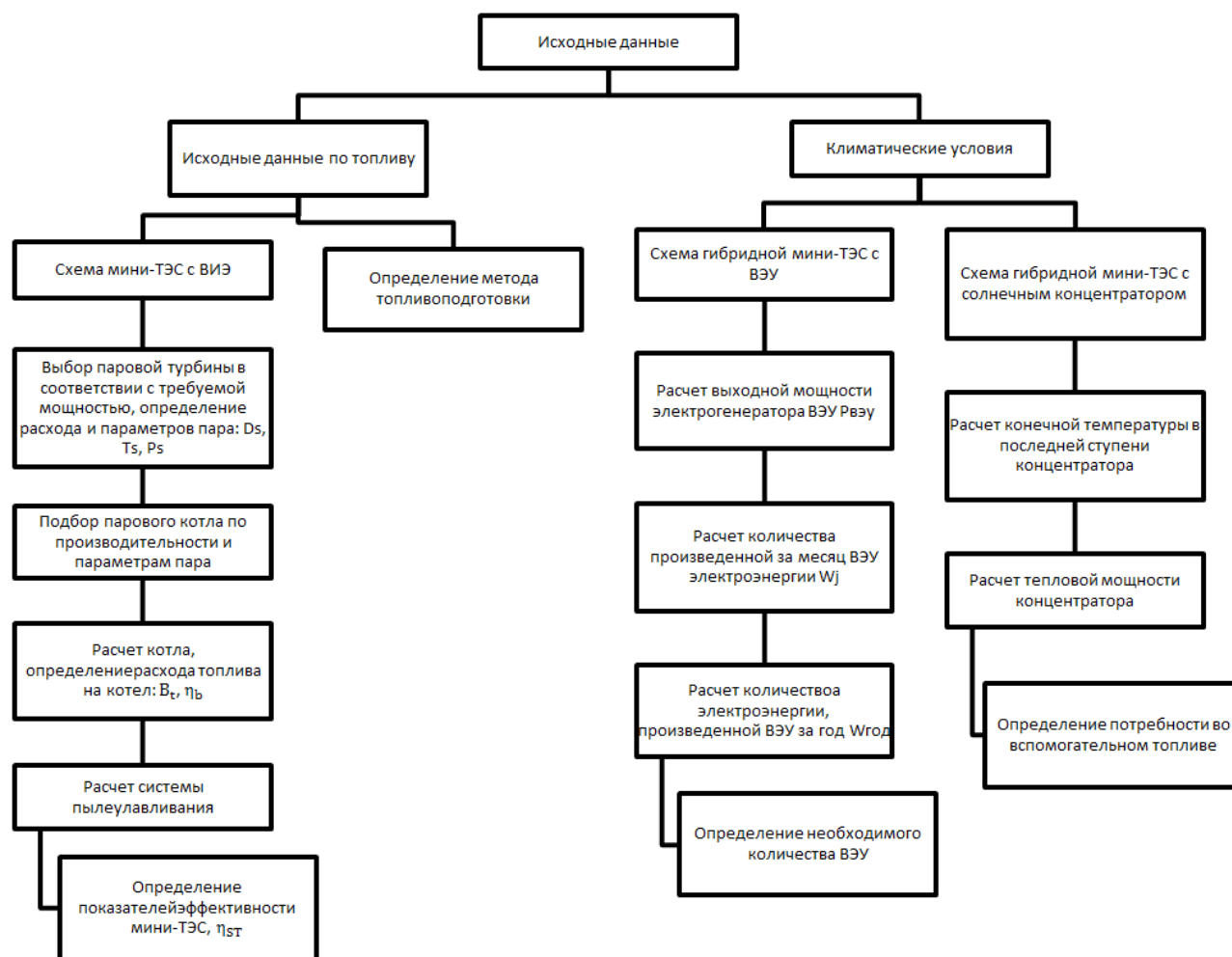


Рис. 1. Алгоритм обобщенного метода выбора технологической схемы гибридной электростанции и его расчета

в землю при проведении полевых работ. Наиболее перспективны для энергетического использования, кроме соломы, также лузга подсолнечника, объемы которой составляют 52.97 тыс. тонн, и шелуха зерновых культур – 198.92 тыс. тонн ежегодно.

В данной работе для утилизации таких отходов с выработкой электрической энергии предлагается малая автономная электростанция, на которой используется биомасса из растительных сельскохозяйственных отходов и солнечная энергия. При этом для обеспечения равномерной выработки энергии предлагается включение твердотопливного котла в контур солнечных коллекторов. Схема, представленная на рисунке 2, работает следующим образом. В контуре солнечных параболических коллекторов 1 синтетическое масло подогревается до 160-400°C за счет солнечного излучения в зависимости от времени года. Затем подогретое масло направляется в котел на биотопливе для дополнительного нагрева до 400°C. Тепловая энергия синтетического масла передается воде для получения перегретого пара в многоступенчатой системе теплообмена. Пар из теплообменника направляется в паровую турбину 4 для выработки электрической энергии.

В качестве теплоносителя в данной схеме могут использоваться жидкости с низкой температурой замерзания для эксплуатации солнечных коллекторов в зимнее время и высокой температурой вспышки для обеспечения образования пара с необходимой температурой и давлением.

В периоды повышенной солнечной активности, когда теплоноситель в трубках-поглотителях нагревается до температуры 390-400°C за счет солнечной инсоляции, биотопливный котел может быть отключен, так как теплоты, получаемой от солнеч-

ного коллектора, достаточно для подогрева теплоносителя до требуемого значения. Теплоноситель напрямую направляется в трехступенчатый теплообменник для получения пара. В ночной период и в условиях погодных-климатических ограничений для гелиоустановок теплоноситель из системы солнечных коллекторов подается в котел для нагрева до необходимой температуры за счет сжигания биотоплива.

Блок топливоподготовки работает следующим образом (рис. 2): сырье из бункера 11 подается в измельчитель 12, далее измельченное до 1-2 мм сырье поступает в смеситель 13, в который вместе с измельченным биотопливом поступает пар для увлажнения топлива и связующее вещество – меласса. Готовая к формованию смесь поступает в экструдер 14, где происходит брикетирование биотоплива. Во время транспортировки биотопливных брикетов от экструдера 14 до бункера хранения 15 осуществляется их естественная сушка.

Суммарная электрическая нагрузка сельскохозяйственных потребителей фермерского хозяйства, состоящего из птичника, коровника, кормоцехов, зернохранилища, семенохранилища, склада минеральных удобрений и гаража, а также административного здания и жилого дома для работников фермы, составляет от 470 до 500 кВт [6].

Таким образом, сельскохозяйственное предприятие (ферма, перерабатывающее предприятие и др.) и гибридную электростанцию можно рассматривать как энергетический комплекс мощностью 500 кВт, предназначенный для автономного обеспечения тепловой и электрической энергией производственных процессов и нужд потребителей и работающий на местных ресурсах.

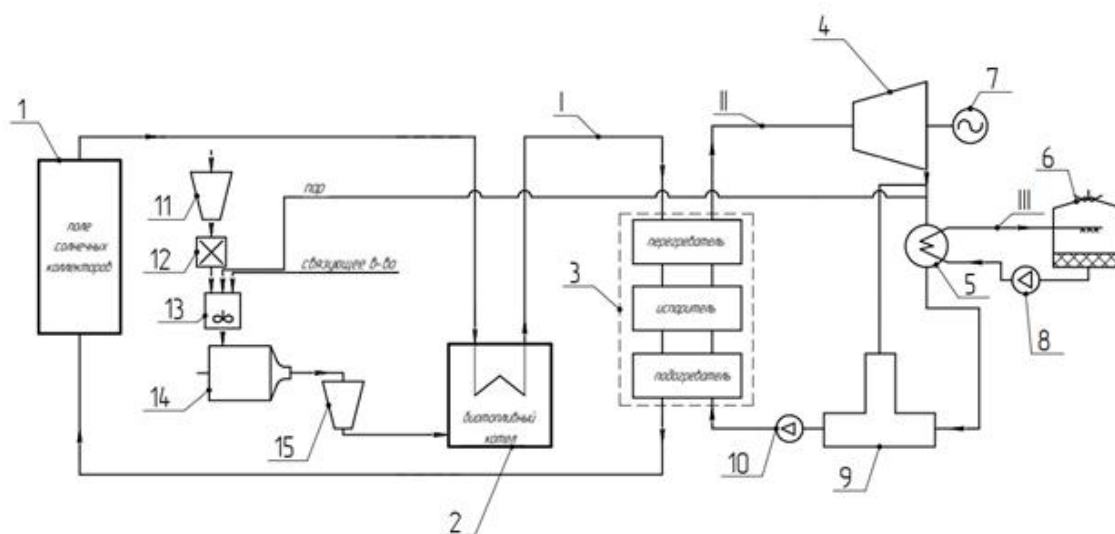


Рис. 2. Схема выработки тепловой и электрической энергии из твердого биотоплива с использованием солнечной энергии: 1 – солнечный параболический коллектор, 2 – биотопливный термомасляный котел, 3 – теплообменник, 4 – паровая турбина, 5 – конденсатор, 6 – вентиляционная градирня, 7 – электрогенератор, 8 – насос, 9 – деаэрактор, 10 – питательный насос, 11 – бункера сырья, 12 – измельчитель, 13 – смеситель, 14 – экструдер, 15 – бункер хранения гранулированного биотоплива

Взаимосвязи между параметрами и технологическими характеристиками компонентов энергоустановки сводятся к компактному набору ключевых показателей, обеспечивающих унифицированное описание разнородных элементов и согласованное моделирование взаимосвязанных процессов. Расчеты выполнены с использованием авторской программы для ЭВМ «Расчетный модуль для определения энергетических показателей гибридной электростанции», в которой учтены ограничения и допущения математической модели [7].

Уравнение энергетического баланса параболического солнечного коллектора имеет вид [8]:

$$Q_{\text{солн.}} \cdot \eta_{\text{опт}} \cdot (\theta) = Q_{\text{п}} + Q_{\text{пот.}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{солн.}}$ – располагаемая солнечная энергия, Вт; $\eta_{\text{опт}}$ – оптический КПД солнечного коллектора; (θ) – модификатор угла падения; $Q_{\text{п}}$ – полезный прирост энергии, Вт; $Q_{\text{пот.}}$ – потери в системе солнечных коллекторов, Вт.

Полезный прирост энергии $Q_{\text{п}}$ в системе солнечных коллекторов рассчитан следующим образом:

$$Q_{\text{п}} = D_{1T} \cdot c_{p1T} \cdot (t'_{1T} - t'_{1T}) + Q_{\text{пот.}}, \quad (2)$$

где D_{1T} – массовый расход теплоносителя, t'_{1T} – температура теплоносителя на входе в коллектор; t'_{1T} – температура теплоносителя на выходе из коллектора; c_{p1T} – средняя удельная теплоемкость теплоносителя.

Потери в системе солнечных коллекторов от излучения и конвекции учитываются по следующей формуле:

$$Q_{\text{пот}} = Q_{\text{изл}} + Q_{\text{тепл}} + Q_{\text{кон}}, \quad (3)$$

где $Q_{\text{изл}}$ – тепловые потери солнечного коллектора за счет излучения, Вт; $Q_{\text{тепл}}$ – потери солнечного коллектора за счет теплопроводности, Вт; $Q_{\text{кон}}$ – потери солнечного коллектора за счет конвективного теплообмена с окружающей средой, Вт.

Потери энергии за счет излучения определяют по зависимости:

$$Q_{\text{изл}} = \varepsilon_{\text{абс}} \cdot A \cdot \sigma \cdot (t_{\text{абс}}^4 - t_{\text{неба}}^4), \quad (4)$$

где $\varepsilon_{\text{абс}}$ – коэффициент эмиссии абсорбера солнечного коллектора, принимается в диапазоне $0.05 \div 0.1$; A – площадь солнечного коллектора, м^2 ; σ – постоянная Стефана-Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; $t_{\text{абс}}$ – температура абсорбера солнечного коллектора, $^\circ\text{C}$, принима-

ется равной температуре теплоносителя в трубках; $t_{\text{неба}}$ – температура небосвода над солнечным коллектором, $^\circ\text{C}$, принимается равной температуре окружающей среды.

Потери энергии за счет теплопроводности и конвективного теплообмена рассчитываются следующим образом:

$$Q_{\text{тепл}} + Q_{\text{кон}} = A \cdot U_L \cdot (t_{\text{абс}} - t_{\text{окр}}), \quad (5)$$

где U_L – коэффициент тепловых потерь за счет конвекции и теплопередачи при заданной скорости ветра, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, задается техническими характеристиками солнечного коллектора; $t_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$.

Ключевым показателем расчета энергоустановки в целом является температура на выходе из солнечного коллектора, $^\circ\text{C}$, которая определяется по следующей формуле:

$$t'_{1T} = t'_{1T} + \frac{Q_{\text{солн.}} \cdot \eta_{\text{опт}} \cdot (\theta) - Q_{\text{пот.}}}{D_{1T} \cdot c_{p1T}}, \quad (6)$$

где t'_{1T} – температура теплоносителя на входе в систему солнечных коллекторов, $^\circ\text{C}$; $Q_{\text{солн.}}$ – располагаемая солнечная энергия, Вт; $\eta_{\text{опт}}$ – оптический КПД солнечного коллектора; (θ) – модификатор угла падения; $Q_{\text{пот.}}$ – потери в системе солнечных коллекторов от излучения и конвекции, Вт.

Расчет термомасляного котла сводится к нахождению теплоты на подогрев синтетического масла и расхода топлива. Расход топлива, $\text{кг}/\text{с}$, подаваемого в топку, рассчитывается следующим образом [9]:

$$B = \frac{Q_{\text{к}} - Q_{\text{п}}}{Q_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{к}}$ – количество тепла, полезно использованное в котле, определяется по формуле, $\text{кДж}/\text{кг}$; $Q_{\text{р}}$ – располагаемое тепло 1 кг твердого топлива, $\text{кДж}/\text{кг}$; $\eta_{\text{к}}$ – КПД котла, %.

Тогда формулу расхода топлива можно записать в следующей форме:

$$B = \frac{D_{1T}[c_{p2T}(t'_{2T} - t'_{1T}) - c_{p1T}(t'_{1T} - t'_{1T})]}{Q_{\text{р}} \cdot \eta_{\text{к}}}, \quad (8)$$

где t'_{1T} – температура синтетического масла на выходе из многоступенчатой системы теплообмена, $^\circ\text{C}$, которая определяется из теплового баланса теплообменного аппарата с учетом фазового перехода одного из теплоносителей [10]:

$$t'_{1T} = t''_{3T} = t'_{3T} - \frac{G_B \cdot c_B (t_s - t'_3) + G_B \cdot r + G_n \cdot (h''_3 - h'_3)}{G_M \cdot c_M}, \quad (9)$$

где G_B – массовый расход воды в подогреватель многоступенчатой системы теплообмена, кг/с; c_B – теплоемкость воды, Дж/(кг·°C); t_s – температура насыщения воды, °C; t'_3 – температура воды на входе в подогреватель многоступенчатой системы теплообмена, °C; r – удельная теплота парообразования воды, Дж/кг; G_n – массовый расход пара в перегреватель многоступенчатой системы теплообмена, кг/с; h''_3 – энтальпия пара на выходе из подогревателя, Дж/кг; h'_3 – энтальпия пара на входе в подогреватель, Дж/кг.

При расчете системы теплообменников искомой величиной является температура теплоносителя на выходе из подогревателя, которая зависит от конструкции теплообменников и режима течения сред в них.

Результаты и обсуждения

Республика Татарстан является регионом Восточно-Европейской равнины и имеет средний уровень солнечного воздействия и умеренное солнечное сияние. Республика Татарстан представляет собой регион, где применение гибридных электростанций является рациональным решением с уче-

том годового изменения угла наклона. В таблице 1 представлены данные солнечной инсоляции и оптимального угла наклона солнечных параболических коллекторов относительно поверхности земли в Республике Татарстан [11].

В схеме гибридной электростанции предполагается установка котла, работающего на высокотемпературном органическом теплоносителе и предназначенного для сжигания топлива низкого качества [12]. Для определения расхода топлива в котле с механической топкой, используемой для сжигания твердого топлива на гибридной электростанции мощностью 500 кВт, использовался нормативный метод расчета.

Исследуемым биотопливом для определения расхода топлива являются топливные гранулы из лузги подсолнечника, соломы и шелухи овса с теплотой сгорания 15.4 МДж/кг, 11.7 МДж/кг и 10.2 МДж/кг соответственно.

На рисунке 3 представлен график изменения показателей работы гибридной электростанции с использованием биотоплива различного состава и солнечной энергии в зависимости от климатических факторов Республики Татарстан в течение года.

Использование гибридных установок для сжигания биомассы и солнечных коллекторов предполагает изменение расхода топлива в диапазоне от 0.8369 до 0.226 кг/с для гранул из соломы в течение

Таблица 1

Солнечная инсоляция и оптимальный угол наклона солнечных параболических коллекторов относительно поверхности земли в Республике Татарстан

	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Солнечная инсоляция, кВт·ч/м²	1.5	2.5	3.9	4.9	5.8	6.2	6.0	4.8	3.5	2.3	1.7	1.4
Оптимальный угол наклона, °	71	63	50	35	20	11	17	29	44	57	69	74

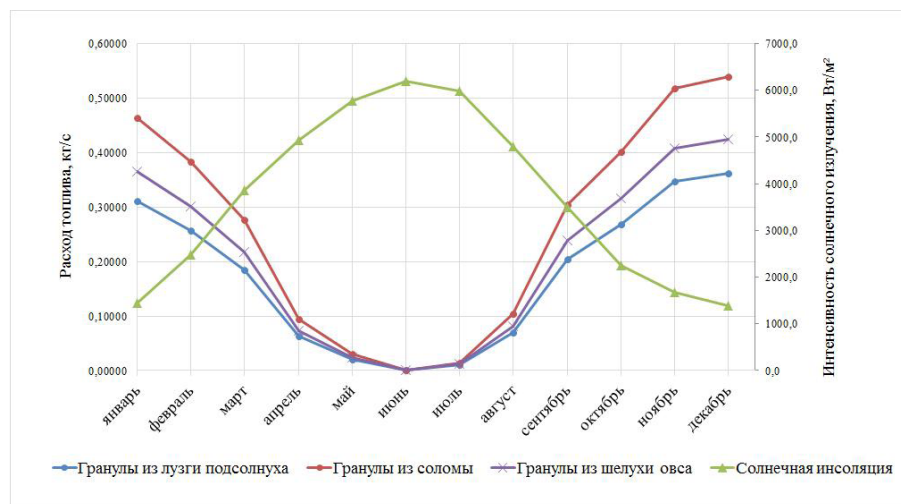


Рис. 3. Расход топлива при сжигании биотопливных гранул различного состава

года. Общий расход топлива за год составляет 8 227.3 тонн. Расход топлива при сжигании гранул из шелухи овса в топке котла составляет 0.6587 кг/с. Параллельное подключение солнечных коллекторов в данную схему снижает расход топлива в среднем до 0.208 кг/с, общий расход биотоплива из шелухи овса составляет 6 474.9 тонн в год. В связи с более высокой теплотой сгорания наименьший расход топлива из рассмотренных видов биотоплива оказался у гранул из лузги подсолнуха и составил 0.561 кг/с. При подключении солнечных коллекторов в контур котла расход биотоплива за год составил 5 514.3 т, расход топлива снизился до 0.176 кг/с.

На рисунке 4 представлен график изменения показателей работы гибридной электростанции с использованием различных теплоносителей в контуре солнечных коллекторов и биотопливного термомасляного котла в зависимости от климатических факторов Республики Татарстан в течение года.

Выбор теплоносителя зависит от его физических характеристик: вязкость, теплоемкость, точка замерзания, точка кипения, температура вспышки. Таким образом, в качестве исследуемых теплоносителей были выбраны эвтектическая смесь бифенил/дифенил оксида (Therminol VP-1) с теплоемкостью 2180 Дж/кг·°C при 400°C, и температурой кипения 400°C, раствор диэтилового спирта и 0.2% порошка кремниевой кислоты с теплоемкостью 2550 Дж/кг·°C при 250°C и температурой кипения 250°C, раствор жидкого диэтилового эфира + (0.1-0.5)% одностенных углеродных нанотрубок (ОСУНТ) с теплоемкостью 2500 Дж/кг·°C при 250°C и температурой кипения 377°C [13].

Расход топлива в термомасляном котле на био-

топливе имеет прямую зависимость от теплоемкости теплоносителя, используемого в системе. Чем больше теплоноситель нагревается в системе параболических солнечных коллекторов, тем меньше топлива затрачивается на подогрев теплоносителя в котле. Таким образом, раствор диэтилового спирта и 0.2% порошка кремниевой кислоты дает снижение расхода топлива с 0.8703 до 0.5512 кг/с при общем расходе топлива 20 180.7 тонн в год. Если в качестве теплоносителя используется раствор жидкого диэтилового эфира с добавлением 0.1-0.5% ОСУНТ, расход биотоплива снижается с 0.9215 до 0.1783 кг/с. Общий расход топлива в год составит 9 695.4 тонн. Эвтектическая смесь бифенил/дифенил оксида позволяет уменьшить расход топлива с 0.561 до 0.176 кг/с. Общий расход топлива в год составит 5 514.3 тонн.

Срок окупаемости для автономных источников энергоснабжения рассчитывается как отношение капитальных затрат к разности между стоимостью энергии, отпускаемой от централизованной энергосистемы (с учетом платы за подключение к электросетям и стоимости самой энергии) и вырабатываемой на объекте [14]:

$$T = \frac{K}{C_{\text{центр.э}} - P_{\text{э}}}, \quad (10)$$

где K – общая стоимость оборудования гибридной электростанции малой мощности, тыс. руб.; $C_{\text{центр.э}}$ – стоимость электроэнергии, отпускаемой от централизованной энергосистемы, с учетом платы за подключение к электросетям, тыс. руб.; $P_{\text{э}}$ – стоимость потребляемой электрической энергии,

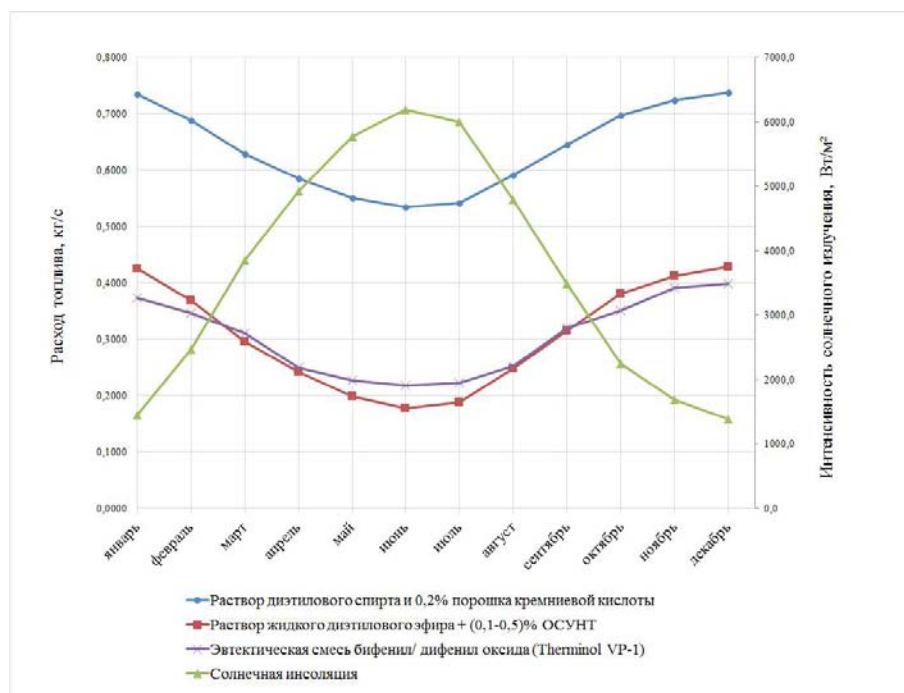


Рис. 4. Расход топлива при использовании различных теплоносителей

вырабатываемой гибридной электростанцией, тыс. руб.

Таким образом, срок окупаемости при капитальных вложениях, равных 100 659 тыс. руб., стоимости электроэнергии, отпускаемой от централизованной энергосистемы, равной 17 237.64 тыс. руб., и стоимости потребляемой электрической энергии, вырабатываемой гибридной электростанцией, равной 4 548.86 тыс. руб., составляет 7 лет 11 месяцев для гибридной электростанции на биотопливе номинальной электрической мощностью 500 кВт, при этом затраты на топливо в течение срока эксплуатации отсутствуют.

Заключение

Проведенные исследования показали высокую эффективность применения автономных гибридных электростанций на основе возобновляемых источ-

ников энергии для децентрализованного энергоснабжения сельскохозяйственных объектов. Разработанная методика выбора и расчета технологических схем гибридных электростанций с учетом климатических особенностей региона позволяет определить оптимальные параметры работы комбинированных энергоустановок на основе биомассы и солнечной энергии. Установлено, что использование топливных гранул из лузги подсолнечника в котлах гибридной электростанции наиболее эффективно в связи с более высокой теплотворной способностью. Гибридная электростанция сельскохозяйственного предприятия с номинальной мощностью 500 кВт может окупиться менее чем за 8 лет, используя местные растительные отходы в качестве топлива. Кроме того, решается серьезная экологическая проблема, связанная с утилизацией растительных отходов.

Список литературы

1. Кусова Ж.Г., Гальперин А.А., Цебоев Р.З., Хузмиев И.К., Гассиева О.И. Локальное энергоснабжение горной зоны с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) // Научные труды Вольного экономического общества России. 2011. №153. С. 99-132. EDN VWYFED.
2. Perez-Navarro A., Alfonso D., Alvarez C., et al. Hybrid biomass-wind power plant for reliable energy generation. Renewable Energy. 2010. Vol. 35. No. 7. Pp. 1436-1443.
3. Nathan G.J., Jafarian M., Dally B.B., et al. Solar thermal hybrids for combustion power plant: Agrowing opportunity. Progress in Energy and Combustion Science. 2018. Vol. 64. Pp. 4-28.
4. Angelo Algieri, PietropaoloMorrone. Thermo-economic investigation of solar-biomass hybrid cogeneration systems based on small-scale transcritical organic Rankine cycles. Applied Thermal Engineering. Vol. 210. 2022. 118312.
5. Mingaleeva G.R., Afanaseva O.V., Nguen D.T., Pham D.N., Zunino P. The Integration of Hybrid Mini Thermal Power Plants into the Energy Complex of the Republic of Vietnam. Energies. 2020. Vol. 13. 5848. DOI 10.3390/en13215848.
6. Набиуллина М.Ф., Мингалеева Г.Р., Афанасьева О.В., Тимофеева С.С. Использование растительных отходов для обеспечения функционирования сельскохозяйственных энергокомплексов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. №3. С. 120-131. DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-3-120-131. EDN TMCAWW.
7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026686845 Российская Федерация. Расчетный модуль для определения энергетических показателей гибридной электростанции: заявл. 07.08.2026; опублик. 02.09.2026 / М.Ф. Набиуллина, Г.Р. Мингалеева; заявитель ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ».
8. Benidir A., Khaldi F., Benmachiche A.H., Bouras F. Numerical thermal analysis of Schott 2008 PTR70 solar receiver under hassiR'mel power plant operation conditions. Journal of Engineering Science and Technology. 2018. No.13. Pp. 122-140.
9. Servet J., San Miguel G., López D. Hybrid solar – biomass plants for power generation. Technical and economic assessment. Global NEST Journal. 2011. V. 13. No. 3. Pp. 266-276.
10. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи: учеб. пособие для вузов / под ред. М.А. Михеева. 2-е изд., стереотип. М.: Энергия. 1977. 344 с.
11. Андреев Т.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Энергетический потенциал агробиомассы в Ростовской области, Краснодарском и Ставропольском краях // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2023. Т. 78. №6. С. 50-63. DOI 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.5. EDN ZCKNIN.
12. Савина М.В., Ндлову Э.Т., Мингалеева Г.Р. Оценка эффективности парового котла типа КЕ при сжигании низкосортного топлива // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2020. №1(45). Т. 12. С. 3-12.
13. Набиуллина М.Ф. Использование различных теплоносителей в солнечных коллекторах гибридных электростанций / М.Ф. Набиуллина // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ VII МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Кемерово, 07-09 декабря 2022 года. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева. 2023. С. 154-1-154-5. EDN BEWZMA.
14. Моделирование технологических схем мини-ТЭС / О.В. Афанасьева, Г.Р. Мингалеева. Москва: Изд. дом МЭИ. 2014. 218 с.

References

1. Kusova Zh.G., Gal'perin A.A., Ceboev R.Z., Huzmiev I.K., Gassieva O.I. Local power supply for mountainous areas using renewable energy sources (RES). *Nauchnye trudy Vol'nogo jekonomicheskogo obshhestva Rossii*. 2011. V. 153. Pp. 99-132. EDN VWYFED.
2. Perez-Navarro A., Alfonso D., Alvarez C., et al. Hybrid biomass-wind power plant for reliable energy generation. *Renewable Energy*. 2010. Vol. 35. No. 7. Pp. 1436-1443.
3. Nathan G.J., Jafarian M., Dally B.B., et al. Solar thermal hybrids for combustion power plant: Agrowing opportunity. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2018. Vol. 64. Pp. 4-28.
4. Angelo Algieri, PietropaoloMorrone. Thermo-economic investigation of solar-biomass hybrid cogeneration systems based on small-scale transcritical organic Rankine cycles. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 210. 2022. 118312.
5. Mingaleeva G.R., Afanaseva O.V., Nguen D.T., Pham D.N., Zunino P. The Integration of Hybrid Mini Thermal Power Plants into the Energy Complex of the Republic of Vietnam. *Energies*. 2020. Vol. 13. 5848. DOI 10.3390/en13215848.

6. Nabiullina M.F., Mingaleeva G.R., Afanas'eva O.V., Timofeeva S.S. The use of plant waste to ensure the functioning of agricultural energy complexes. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Problemy jenergetiki*. 2024. V. 26. No. 3. Pp. 120-131. DOI 10.30724/1998-9903-2024-26-3-120-131. EDN TMCAWW.
7. Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2026686845 (Russian Federation). Calculation module for determining the energy performance indicators of a hybrid power plant: application filed 07.08.2026; published 02.09.2026. M.F. Nabiullina, G.R. Mingaleeva; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Kazan State Power Engineering University».
8. Benidir A., Khaldi F., Benmachiche A.H., Bouras F. Numerical thermal analysis of Schott 2008 PTR70 solar receiver under hassiR'mel power plant operation conditions. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2018. No.13. Pp. 122-140.
9. Servet J., San Miguel G., López D. Hybrid solar – biomass plants for power generation. Technical and economic assessment. *Global NEST Journal*. 2011. V. 13. No. 3. Pp. 266-276.
10. Miheev M.A., Miheeva I.M. *Osnovy teploperedachi: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Fundamentals of Heat Transfer: a textbook for universities]. Ed. by M.A. Mikheev. 2nd ed., unaltered. Moscow: Energiya. 1977. 344 p.
11. Andreenko T.I., Kiseleva S.V., Rafikova Ju.Ju. The energy potential of agrobiomass in the Rostov Region, as well as in the Krasnodar and Stavropol Territories. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografija*. 2023. V. 78. No. 6. Pp. 50-63. DOI 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.5. EDN ZCKNIN.
12. Savina M.V., Ndlovu Je.T., Mingaleeva G.R. Assessment of the efficiency of a KE-type steam boiler when burning low-grade fuel. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo jenergeticheskogo universiteta*. 2020. No. 1(45). V. 12. Pp. 3-12.
13. Nabiullina M.F. *Ispol'zovaniye razlichnykh teplonositeley v solnechnykh kollektorakh gibridnykh elektrostantsiy* [The use of various heat carriers in solar collectors of hybrid power plants]. Energy and Energy Conservation: Theory and Practice: Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference, Kemerovo, December 7-9, 2022. Kemerovo: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. 2023. Pp. 154-1-154-5. EDN BEWZMA.
14. Afanas'eva O.V., Mingaleeva G.R. *Modelirovaniye tekhnologicheskikh skhem mini-TES* [Modeling of technological schemes of mini-thermal power plants]. Moscow: Publishing house. MPEI house. 2014. 218 p.

Сведения об авторах
Принадлежность к организации

Набиуллина Мадина Фаридовна

старший преподаватель кафедры «Энергетическое машиностроение», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, Казань, Россия

Мингалеева Гузель Рашидовна

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Энергетическое машиностроение» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, Казань, Россия

Information about authors
Affiliations

Nabiullina Madina Faridovna

Senior Lecturer at the Department of Power Engineering, Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Mingaleeva Guzel Rashidovna

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Power Engineering at Kazan State Energy University, 420066, Kazan, Russia

Поступила в редакцию 07.08.2026 г.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КАССЕТНОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛА ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В ИНДИВИДУАЛЬНОМ ТЕПЛОВОМ ПУНКТЕ

Пономарев Р.А., Ваньков Ю.В., Бусаров А.В.

Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, Россия

e-mail: romanponomarevich@mail.ru

Рассмотрено применение кассетного аккумулятора тепла фазового перехода для сглаживания суточных пиков нагрузки горячего водоснабжения многоквартирного дома. Цель работы – разработать схему интеграции аккумулятора в индивидуальный тепловой пункт и оценить ее технико-экономическую эффективность по фактическому суточному графику теплопотребления. Геометрия промышленной секции принята на основе ранее опубликованных экспериментальных исследований поперечного оребрения: для лабораторного образца рациональной признана конфигурация с 8 ребрами и межреберным расстоянием 20–22 мм. При масштабировании длина секции увеличена с 0.2 до 1.0 м с сохранением радиальной геометрии; расчетная энергоемкость секции составляет 0.37 кВт·ч. Для рассматриваемого объекта требуется 61 секция общей энергоемкостью 22.6 кВт·ч. Часовое моделирование показало частичное покрытие суммарного дефицита утреннего и вечернего пиков и снижение максимальной нагрузки с 48.9 до 43.25 кВт утром и с 46.1 до 42.33 кВт вечером. Капитальные затраты оценены в 311 тыс. руб., годовые эксплуатационные – 11.85 тыс. руб. При расчетном экономическом эффекте 68 тыс. руб./год простой срок окупаемости составляет 5.5 года, NPV за 15 лет при ставке дисконтирования 10% – 116.1 тыс. руб., индекс доходности – 1.37. Новизна работы состоит в переходе от экспериментально обоснованной лабораторной конструкции к кассетному аккумулятору промышленного масштаба и оценке его работы в составе реального теплового пункта.

Ключевые слова: аккумулятор тепла фазового перехода, горячее водоснабжение, индивидуальный тепловой пункт, пиковая тепловая нагрузка, тепловое аккумулирование, технико-экономическая оценка.

TECHNO-ECONOMIC ASSESSMENT OF CASSETTE PHASE-CHANGE HEAT ACCUMULATOR IN INDIVIDUAL HEATING SUBSTATION

Ponomarev R.A., Vankov Yu.V., Busarov A.V.

Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

A cassette phase-change heat accumulator is considered for smoothing short-term domestic hot-water load peaks in a residential individual heating substation. The study aims to develop an integration scheme and evaluate its technical and economic performance using an actual daily heat-consumption profile. The industrial section geometry is based on previously published experiments on transverse finning, where an eight-fin configuration with a 20–22 mm fin spacing was identified as rational for the laboratory unit. The section length was scaled from 0.2 to 1.0 m while preserving the radial geometry; its calculated storage capacity is 0.37 kWh. For the case study, 61 sections with a total capacity of 22.6 kWh are required. Hourly energy-balance modelling shows partial coverage of the combined morning and evening peak deficit and a reduction of the maximum load from 48.9 to 43.25 kW in the morning and from 46.1 to 42.33 kW in the evening. Capital costs are estimated at RUB 311 thousand and annual operating costs at RUB 11.85 thousand. For the adopted economic-effect scenario of RUB 68 thousand per year, the simple payback period is 5.5 years, the 15-year NPV at a 10% discount rate is RUB 116.1 thousand, and the profitability index is 1.37. The novelty lies in transferring an experimentally substantiated laboratory design to an industrial-scale cassette system and evaluating it within a real heating-substation load profile.

Keywords: phase-change heat accumulator, hot water supply, individual heating substation, peak heat load, thermal energy storage, techno-economic assessment.

Введение

Суточная неравномерность горячего водоснабжения (ГВС) приводит к кратковременному росту нагрузки на теплообменное оборудование и расхода сетевой воды. Традиционное резервирование мощности снижает чувствительность системы к пикам, но увеличивает установленную мощность и ухудшает режимы работы оборудования при малом водоразборе [1,2]. Одним из способов перераспределения нагрузки во времени является аккумулирование теплоты. Для низкотемпературных систем практический интерес представляют аккумуляторы тепла фазового перехода (АТФП), использующие скрытую теплоту плавления и кристаллизации теплоаккумулирующего материала [3,4].

Возможность применения фазопереходных накопителей для приготовления горячей воды подтверждена экспериментальными работами [5,6,7], а вопросы их интеграции с тепловыми насосами и низкотемпературными системами теплоснабжения рассмотрены в [8,9,10]. Современные исследования также показывают значимость алгоритмов управления накоплением для перераспределения нагрузки во времени [11,12]. При этом надежность теплоснабжения остается связанной с режимами работы сетей и оборудования [13].

Ограничением парафиновых теплоаккумулирующих материалов является низкая теплопроводность, поэтому конструкция АТФП требует интенсификации теплообмена. В ранее опубликованной

работе авторов [14] экспериментально исследованы цилиндрические образцы с 6, 8 и 10 поперечными ребрами. По совокупности времени зарядки, пиковой скорости плавления, материалоемкости и полезного объема, рациональной признана конфигурация с 8 ребрами: время достижения 80% расплава составило 162.7 мин и было на 17.7% меньше, чем для базового варианта с 6 ребрами. Для 10 ребер дальнейшего сокращения времени практически не получено вследствие частичного ограничения естественной конвекции. Дополнительная интенсификация со стороны теплоносителя может быть обеспечена наномодифицированными жидкостями; соответствующие механизмы и ограничения рассмотрены в [15,16].

Таким образом, экспериментальное обоснование геометрии оребрения уже получено, однако для практического применения необходимо перейти от лабораторного образца к промышленной секции, определить количество модулей по реальному графику ГВС и оценить экономическую реализуемость системы. Цель настоящей работы – разработка схемы интеграции кассетного АТФП в индивидуальный тепловой пункт многоквартирного дома и оценка его работы и экономической эффективности по фактическому суточному графику теплопотребления.

Материалы и методы

В основу промышленной секции положена геометрия, экспериментально обоснованная в [14]. При масштабировании длина корпуса увеличена с 0.2 до 1.0 м, а радиальные размеры сохранены: внутренний диаметр корпуса 106 мм, наружный диаметр теплообменной трубки 10 мм, толщина поперечных ребер 1 мм, их радиус 45 мм и межреберное расстояние 20-22 мм. Количество ребер увеличено пропорционально длине с 8 до 40. Такое масштабирование сохраняет характерный радиальный путь

теплопереноса, тогда как увеличение длины преимущественно повышает массу теплоаккумулирующего материала.

В лабораторных образцах теплообменник и ребра изготавливались из меди, корпус – из поликарбоната. Для промышленной секции приняты алюминиевые теплообменные элементы и полипропиленовый корпус. Теплопроводность алюминия значительно выше теплопроводности парафина, поэтому вклад металлических элементов в суммарное термическое сопротивление остается малым по сравнению с сопротивлением слоя теплоаккумулирующего материала. Масса парафина в секции составляет 6.84 кг. При средней теплоемкости 2.412 кДж/(кг·К), рабочем диапазоне 40-60°C и скрытой теплоте плавления 146 кДж/кг расчетная энергоемкость секции составляет около 0.37 кВт·ч. Для инженерного расчета приняты средняя мощность зарядки 0.15 кВт и средняя мощность разрядки 0.75 кВт на секцию.

Схема интеграции предусматривает разделение сетевой воды, воды ГВС и замкнутого контура АТФП. Зарядка осуществляется через теплообменник ТО1, разрядка – через теплообменник ТО2. В аккумуляторном контуре циркулирует водная суспензия углеродных нанотрубок концентрацией 0.1 масс. %, а для ограничения агломерации предусмотрен узел периодического ультразвукового диспергирования. Такое разделение исключает контакт наночастиц с водой, подаваемой потребителю, и локализует наномодифицированный теплоноситель в малом замкнутом объеме.

Для определения требуемого количества секций использован суточный график теплопотребления многоквартирного жилого дома по адресу: г. Казань, ул. Глушко, 16, полученный по данным АО «Татэнерго» за 01.08.2025 г. Выбор неотапительного периода позволяет рассматривать тепловую

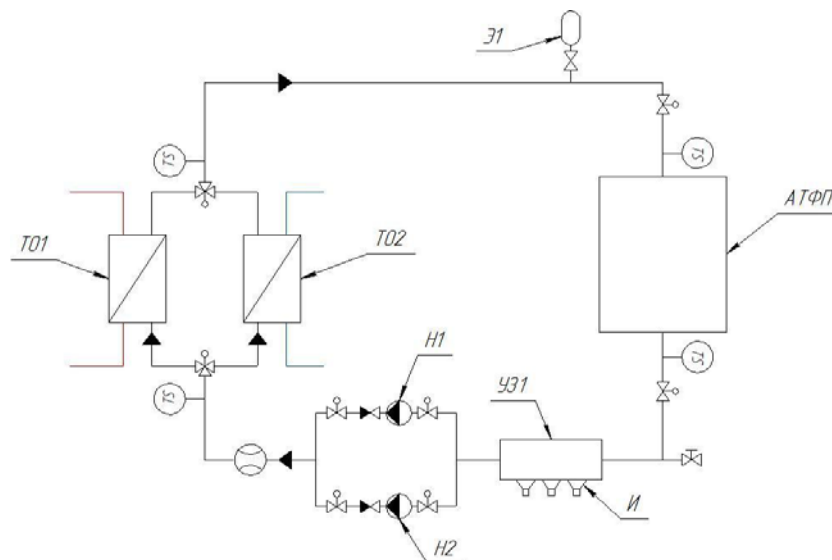


Рис. 1. Принципиальная схема интеграции кассетного АТФП: ТО1 – теплообменник зарядки; ТО2 – теплообменник разрядки; УЗ – ультразвуковой узел

нагрузку преимущественно как нагрузку системы горячего водоснабжения. Среднесуточная тепловая нагрузка составляет 35.2 кВт, максимальная часовая нагрузка достигает 48.9 кВт, минимальная – 23.4 кВт. В интервале 00:00-06:00 теплопотребление в среднем на 38% ниже, чем в остальное время суток, что позволяет использовать данный период для зарядки аккумулятора.

Дефицит тепловой энергии относительно базовой мощности 35.2 кВт составляет 15.1 кВт·ч в утренний период 07:00-09:00 и 19.4 кВт·ч в вечерний период 19:00-22:00. Расчетное количество секций определено по максимальному вечернему дефициту с коэффициентом запаса 1.15:

$$N = \frac{E_{веч} k_{зан}}{E_{секц}} = \frac{19.4 \cdot 1.15}{0.37} \approx 60.3 = 61$$

Таким образом, принято 61 секция. Полная энергоемкость кассетного АТФП составляет 22.6 кВт·ч, суммарная расчетная средняя мощность зарядки – 9.15 кВт, а мощность разрядки – 45.8 кВт.

Моделирование суточного режима показывает перераспределение части тепловой нагрузки из пиковых периодов в часы пониженного потребления. В ночном интервале осуществляется зарядка АТФП, в результате чего нагрузка на источник увеличивается не более чем на 9.15 кВт. В часы максимального водоразбора аккумулятор переходит в режим разрядки. Полученный эффект сглаживания суточного графика представлен на рис. 2.

Суммарный дефицит тепловой энергии за утренний и вечерний пики составляет 34.5 кВт·ч, что превышает полную энергоемкость кассетного АТФП, равную 22.6 кВт·ч. Следовательно, предложенная система не предназначена для полного покрытия обоих пиков за счет одной ночной зарядки, а обеспечивает их частичное сглаживание. Расчетная энергоемкость аккумулятора соответствует примерно 65% суммарного пикового дефицита.

Таким образом, кассетный АТФП позволяет перераспределить тепловую нагрузку в течение суток

и уменьшить максимальные значения нагрузки на основное теплообменное оборудование без увеличения его установленной мощности.

Результаты и обсуждение

По результатам часового баланса максимальная нагрузка на основной теплообменник уменьшается утром с 48.9 до 43.25 кВт, вечером – с 46.1 до 42.33 кВт. В ночной период нагрузка источника, напротив, возрастает за счет зарядки АТФП, однако перенос энергии происходит в интервал пониженного водоразбора. Таким образом, основным техническим эффектом является перераспределение части тепловой нагрузки из пиковых часов в период меньшего потребления.

Ориентировочные капитальные затраты на один объект составляют 311 тыс. руб. В расчет включены 61 секция АТФП (около 88.3 тыс. руб.), два пластинчатых теплообменника, циркуляционный насос, трубопроводы и арматура, теплоизоляция, автоматика и контрольно-измерительные приборы, ультразвуковой узел, монтаж и резерв непредвиденных расходов. Годовые эксплуатационные затраты по принятой смете составляют 11.85 тыс. руб./год и включают электроэнергию вспомогательного оборудования, техническое обслуживание и периодическое обновление наножилок.

Экономический эффект рассматривается с позиции теплоснабжающей организации. В условиях одноставочного тарифа суммарное потребление тепловой энергии домом практически не уменьшается, поэтому прямое снижение платежей конечного потребителя не является основным результатом проекта. Эффект формируется за счет снижения нагрузки на пиковое оборудование, перераспределения части выработки в более благоприятный режим и сценарного уменьшения ущерба, связанного с работой изношенных тепловых сетей.

По информационным данным, протяженность тепловых сетей АО «Татэнерго» в Казани составляет 704 км, норматив ежегодной замены – 6%, расчетная стоимость замены 1 км – 129.3 млн руб. Для оценки предотвращенного ущерба приняты две сценарные

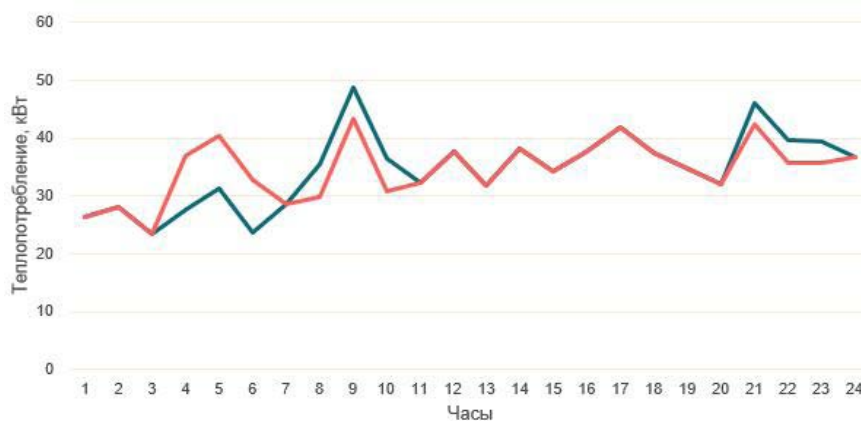


Рис. 2. Суточный график тепловой нагрузки ГВС до и после интеграции кассетного АТФП: синяя линия – исходный график теплопотребления; красная линия – сглаженный график

доли: 30% затрат на замену отнесено к аварийной составляющей, 20% этой составляющей – к авариям, усугубляемым пиковыми режимами. При 6163 многоквартирных домах оценка на один объект составляет $U=704 \cdot 0.06 \cdot 129.3 \cdot 10^6 \cdot 0.30 \cdot 0.20 / 6163 \approx 53$ тыс. руб./год. Поскольку доли 30 и 2 % являются расчетными предпосылками, величину 53 тыс. руб./год следует трактовать как сценарную, а не как непосредственно измеренный предотвращенный ущерб.

Дополнительный эффект принят в размере 9.94 тыс. руб./год за счет переноса части тепловой энергии из пикового режима в базовый и 5 тыс. руб./год за счет уменьшения износа пикового оборудования. В принятом расчетном сценарии суммарный годовой эффект составляет 68 тыс. руб. При эксплуатационных затратах 11.85 тыс. руб./год чистый годовой денежный поток равен 56.15 тыс. руб./год. Простой срок окупаемости составляет $PP=311/56.15=5.5$ года. При ставке дисконтирования 10% и горизонте 15 лет аннуитет-фактор равен 7.606, поэтому $NPV=56.15 \cdot 7.606 - 311=116.1$ тыс. руб., а $PI=(311+116.1)/311=1.37$.

Полученные показатели соответствуют положительному инвестиционному результату в принятом сценарии. Вместе с тем экономическая часть чувствительна к предпосылкам о доле аварийной составляющей и влиянии пиковых режимов. Поэтому перед промышленным внедрением необходима

опытная эксплуатация на реальном тепловом пункте с регистрацией расхода сетевой воды, фактических циклов зарядки-разрядки, энергопотребления вспомогательных устройств и эксплуатационных затрат. Такой этап позволит заменить сценарные коэффициенты наблюдаемыми данными и уточнить экономический эффект.

Выводы

1. Экспериментально обоснованная ранее конфигурация с 8 поперечными ребрами и межреберным расстоянием 20-22 мм использована как основа промышленной секции длиной 1.0 м. При сохранении радиальной геометрии расчетная энергоемкость секции составляет 0.37 кВт·ч.

2. Для фактического суточного графика ГВС рассматриваемого дома расчетное количество секций составляет 61, суммарная емкость – 22.6 кВт·ч. Аккумулятор обеспечивает частичное сглаживание совокупного пикового дефицита; максимальная нагрузка основного теплообменника снижается с 48.9 до 43.25 кВт утром и с 46.1 до 42.33 кВт вечером.

3. При капитальных затратах 311 тыс. руб., эксплуатационных затратах 11.85 тыс. руб./год и расчетном годовом эффекте 68 тыс. руб. простой срок окупаемости составляет 5.5 года, NPV за 15 лет при 10% – 116.1 тыс. руб., PI – 1.37. Экономический результат зависит от принятых сценарных предпосылок и требует уточнения по данным опытной эксплуатации.

Работа, по результатам которой выполнена статья, проведена в рамках Государственного задания №075-03-2025-458 от 17.01.2025 года.

Список литературы

1. Ваньков Ю.В., Запольская И.Н., Измайлова Е.В., Загретдинов А.Р., Валиев Р.Н. Снижение тепловых потерь энергоснабжающей организации модернизацией систем горячего водоснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. №4. С. 13-24.
2. Ротов П.В., Горшков А.В., Ротова М.А. О целесообразности изменения схемы подключения установок горячего водоснабжения // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2024. Т. 26. №5. С. 54-65.
3. Милёхин М.И., Умеренков Е.В. Тепловые аккумуляторы фазового перехода на основе парафина // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024. Т. 28. №3. С. 36-49.
4. Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. V. 13. No. 2. Pp. 318-345.
5. Djeflal R., Cherier M.K., Bekkouche S.M.E.A., Younsi Z., Hamdani M., Al-Saadi S. Concept development and experimentation of a Phase Change Material (PCM) enhanced domestic hot water. Journal of Energy Storage. 2022. V. 51. 104400.
6. Pakalka S., Donélien J., Rudzikas M., Valančius K., Streckienė G. Development and experimental investigation of full-scale phase change material thermal energy storage prototype for domestic hot water applications. Journal of Energy Storage. 2024. V. 80. 110283.
7. Rendall J., Elatar A., Nawaz K., Sun J. Medium-temperature phase change material integration in domestic heat pump water heaters for improved thermal energy storage. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2023. V. 185. 113656.
8. Quirosa G., Torres M., Soltero V.M., Chacartegui R. Analysis of an ultra-low temperature district heating and cooling as a storage system for renewable integration. Applied Thermal Engineering. 2022. V. 216. 119052.
9. Shan L., Martin A., Chiu J.N.W. Techno-economic analysis of latent heat thermal energy storage integrated heat pump for indoor heating. Energy. 2024. V. 298. 131291.
10. Topal H.I., Arabkoohsar A. Enhancing ultra low temperature district heating systems with neighborhood-scale heat pump and tripe-pipe distribution: A techno-economic analysis. Journal of Building Engineering. 2024. V. 95. 110316.
11. Perrella S., Bisegna F., Bevilacqua P., Cirone D. Solar-assisted heat pump with electric and thermal storage: The role of appropriate control strategies for the exploitation of the solar source. Buildings. 2024. V. 14. No. 1. 296.
12. Rashid F.L., Al-Obaidi M.A., Dulaimi A., Mahmood D.M.N. A review of recent improvements, developments, and effects of using phase-change materials in buildings to store thermal energy. Designs. 2023. V. 7. No. 4. 90.
13. Akhmetova I., Zalyalova A., Nurislamova A. Reliability of heating networks as a factor of sustainable development of thermal power industry. E3S Web of Conferences. 2023. V. 461. 01018.
14. Пономарев Р.А., Ваньков Ю.В. Влияние поперечного оребрения на кинетику зарядки цилиндрического аккумулятора тепла фазового перехода // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2026. Т. 28. №4. С. 126-138. DOI: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-126-138.

15. Kolsi L., Hussein A.K., Hassen W., Ben Said L., Ayadi B., Rajhi W., Labidi T., Shawabkeh A., Ramesh K. Numerical study of a phase change material energy storage tank working with carbon nanotube-water nanofluid under Ha'il city climatic conditions. *Mathematics*. 2023. V. 11. No. 4. 1057.
16. Said Z., Sundar L.S., Tiwari A.K., Ali H.M., Sheikholeslami M., Bellos E., Babar H. Recent advances on the fundamental physical phenomena behind stability, dynamic motion, thermophysical properties, heat transport, applications, and challenges of nanofluids. *Physics Reports*. 2022. V. 946. Pp. 1-94.

References

1. Vankov Yu.V., Zapolskaya I.N., Izmailova E.V., Zagretidinov A.R., Valiev R.N. Reducing heat losses of an energy supply organization through modernization of hot water supply systems. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2018. No. 4. Pp. 13-24.
2. Rotov P.V., Gorshkov A.V., Rotova M.A. On the feasibility of changing the connection scheme for hot water supply systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2024. Vol. 26. No. 5. Pp. 54-65.
3. Milyokhin M.I., Umerenkov E.V. Thermal phase change accumulators based on paraffin. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*. 2024. Vol. 28. No. 3. Pp. 36-49.
4. Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. V. 13. No. 2. Pp. 318-345.
5. Djeflal R., Cherier M.K., Bekkouche S.M.E.A., Younsi Z., Hamdani M., Al-Saadi S. Concept development and experimentation of a Phase Change Material (PCM) enhanced domestic hot water. *Journal of Energy Storage*. 2022. V. 51. 104400.
6. Pakalka S., Donélie J., Rudzikas M., Valančius K., Streckienė G. Development and experimental investigation of full-scale phase change material thermal energy storage prototype for domestic hot water applications. *Journal of Energy Storage*. 2024. V. 80. 110283.
7. Rendall J., Elatar A., Nawaz K., Sun J. Medium-temperature phase change material integration in domestic heat pump water heaters for improved thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. V. 185. 113656.
8. Quirosa G., Torres M., Soltero V.M., Chacartegui R. Analysis of an ultra-low temperature district heating and cooling as a storage system for renewable integration. *Applied Thermal Engineering*. 2022. V. 216. 119052.
9. Shan L., Martin A., Chiu J.N.W. Techno-economic analysis of latent heat thermal energy storage integrated heat pump for indoor heating. *Energy*. 2024. V. 298. 131291.
10. Topal H.I., Arabkoohsar A. Enhancing ultra low temperature district heating systems with neighborhood-scale heat pump and triple-pipe distribution: A techno-economic analysis. *Journal of Building Engineering*. 2024. V. 95. 110316.
11. Perrella S., Bisegna F., Bevilacqua P., Cirone D. Solar-assisted heat pump with electric and thermal storage: The role of appropriate control strategies for the exploitation of the solar source. *Buildings*. 2024. V. 14. No. 1. 296.
12. Rashid F.L., Al-Obaidi M.A., Dulaimi A., Mahmood D.M.N. A review of recent improvements, developments, and effects of using phase-change materials in buildings to store thermal energy. *Designs*. 2023. V. 7. No. 4. 90.
13. Akhmetova I., Zalyalova A., Nurislamova A. Reliability of heating networks as a factor of sustainable development of thermal power industry. *E3S Web of Conferences*. 2023. V. 461. 01018.
14. Ponomarev R.A., Vankov Yu.V. The Effect of Transverse Fins on the Charging Kinetics of a Cylindrical Phase-Change Heat Storage Tank. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2026. Vol. 28. No. 4. Pp. 126-138. DOI: 10.30724/1998-9903-2026-28-4-126-138.
15. Kolsi L., Hussein A.K., Hassen W., Ben Said L., Ayadi B., Rajhi W., Labidi T., Shawabkeh A., Ramesh K. Numerical study of a phase change material energy storage tank working with carbon nanotube-water nanofluid under Ha'il city climatic conditions. *Mathematics*. 2023. V. 11. No. 4. 1057.
16. Said Z., Sundar L.S., Tiwari A.K., Ali H.M., Sheikholeslami M., Bellos E., Babar H. Recent advances on the fundamental physical phenomena behind stability, dynamic motion, thermophysical properties, heat transport, applications, and challenges of nanofluids. *Physics Reports*. 2022. V. 946. Pp. 1-94.

Сведения об авторах

Принадлежность к организации

Пономарев Роман Андреевич

старший преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, Россия

Ваньков Юрий Витальевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, Россия

Бусаров Андрей Владимирович

кандидат технических наук, председатель государственной экзаменационной комиссии кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», Казанский государственный энергетический университет, 420066, Казань, Россия

Information about authors

Affiliations

Ponomarev Roman Andreevich

Senior Lecturer at the Department of Industrial Heat and Power Engineering and Heat Supply Systems, Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Vankov Yuri Vitalievich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial Heat and Power Engineering and Heat Supply Systems, Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Busarov Andrey Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Chairman of the State Examination Commission of the Department of Industrial Heat and Power Engineering and Heat Supply Systems, Kazan State Power Engineering University, 420066, Kazan, Russia

Поступила в редакцию 03.08.2026 г.

КАТАЛОГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО КАВКАЗА (ТЕРРИТОРИЯ ДАГЕСТАНА И ПРИГРАНИЧНЫЕ ЗОНЫ) И АКВАТОРИИ СРЕДНЕГО КАСПИЯ ЗА II 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 во II квартале 2026 г., приводятся карта эпицентров и каталог землетрясений в рассматриваемый период.

Ключевые слова: плотность эпицентров, параметры гипоцентра, сейсмическая активность.

CATALOG OF EARTHQUAKES FOR NORTHEASTERN CAUCASUS (DAGESTAN AND BORDER AREAS) AND THE MIDDLE CASPIAN FOR THE II QUARTER 2026

Magomedov Kh.D., Adilov Z.A., Asekova Z.O., Bzhasso M.A., Gamidova A.M., Sagatlova 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 II quarter of 2026 is considered, a map of epicenters and a catalog of earthquakes for the period under consideration.

Keywords: epicenter density, hypocenter parameters, seismic activity.

Во втором квартале 2026 г. на территории Дагестана и приграничных зон повышенные значения плотности эпицентров и активности наблюдаются, как и в предыдущем квартале [1], на территории Чеченской Республики, в очаговой зоне Дагестанского землетрясения 1970 г., в прибрежной акватории Каспийского моря между городами Каспийск и Избербаш. Наибольшее выделение сейсмической энергии за квартал наблюдается на территории Чеченской Республики.

Повышенная сейсмоактивность наблюдается в апреле, землетрясения кластеризуются в двух районах: в районе пересечения границ Дагестана, Чеченской Республики и Грузии и в прибрежной акватории Каспийского моря между городами Каспийск и Избербаш. Причем кластер землетрясений в районе пересечения границ Дагестана, Чеченской Республики и Грузии образуется из 86 землетрясений, из которых два землетрясения 10-го энергетического класса (ЭК) и 4 землетрясения 9-го ЭК. Также в апреле зарегистрированы одно землетрясение 11-го ЭК на территории Чеченской Республики, два землетрясения 10-го ЭК – на территории Республики Дагестан. Основные параметры гипоцентра землетрясения 11-го ЭК на территории Чеченской Республики, которое произошло 1 апреля в 12^h56^m (по Гринвичу), определены региональной сетью сейсмических станций Дагестанского филиала ФИЦ

ЕГС РАН: $\varphi=42.70^{\circ}\text{N}$; $\lambda=45.89^{\circ}\text{E}$; $K_p=10.61$; $M_s=3.67$; $h=18$ км [2]. В эпицентре землетрясение ощущалось с силой сотрясений около 4 баллов.

В месяц май сейсмическая активность начала спадать. Зарегистрированы два землетрясения 10-го ЭК на территории Чеченской Республики.

В июне продолжается дальнейшее падение сейсмоактивности, но при этом активизировался район кластеризации землетрясений в прибрежной акватории Каспийского моря между городами Каспийск и Избербаш. Зарегистрированы два землетрясения 9-го ЭК в приграничных районах Дагестана и Чеченской Республики.

Карта эпицентров землетрясений во II квартале 2026 г. представлена на рис. 1. Энергетическая классификация землетрясений производится по шкале Т.Г. Раутиан [3].

Распределение землетрясений за II 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 $\gamma=0.48$, представителем седьмой ЭК.

Инструментальный каталог землетрясений рассматриваемой территории за II квартал 2026 г. [2] представлен в таблице 2.

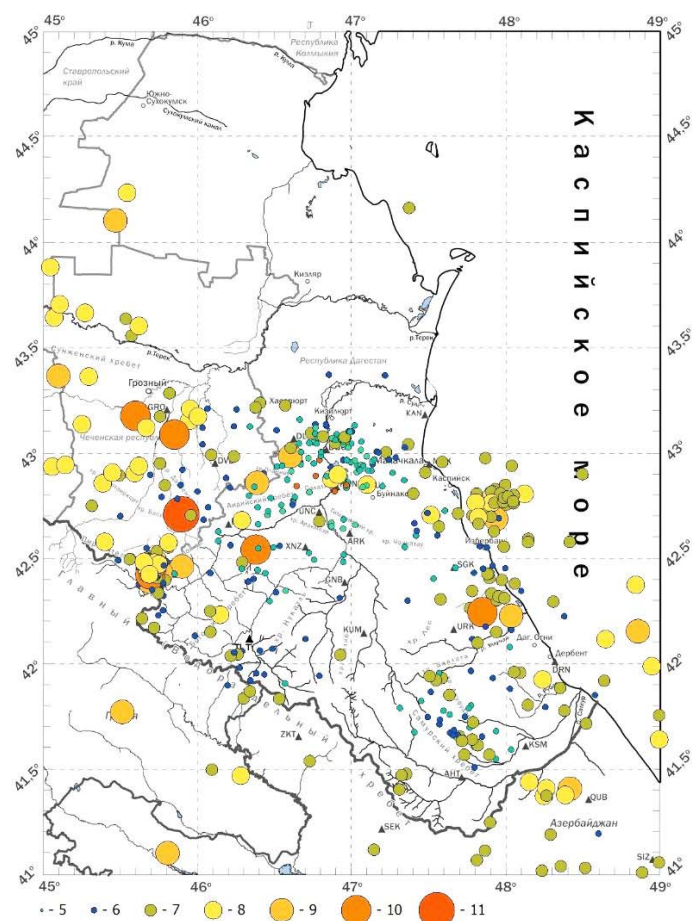


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений исследуемой территории за II квартал 2026 г.

Таблица 1

Распределение землетрясений по энергетическим классам и выделившаяся сейсмическая энергия за II квартал 2026 г.

K_p	5	6	7	8	9	10	11	ΣE , Дж
N	92	138	158	53	14	6	1	$2.29 \cdot 10^{11}$

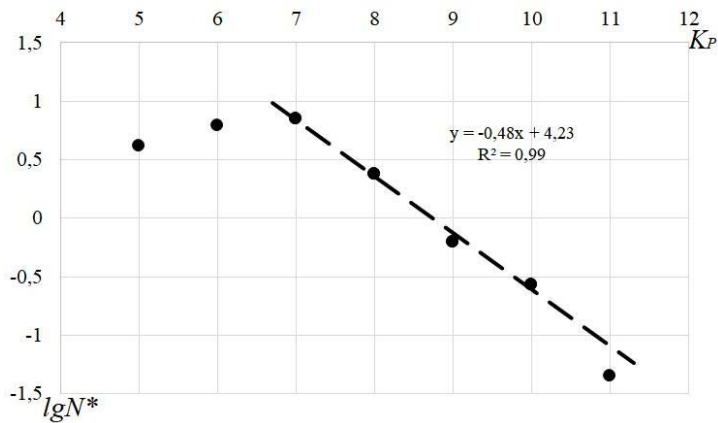


Рис. 2. График повторяемости за II квартал 2026 г.

Таблица 2

Инструментальный каталог землетрясений Дагестана и прилегающих районов за II 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	01.04.26	07-20-02.26	-0.20	41.63	47.72	24	1.75	6.86	1.59	5	Чеченская Республика
2	01.04.26	12-56-57.26	0.07	42.71	45.89	18	1.73	10.61	3.67	10	
3	01.04.26	23-16-25.87	0.06	42.70	45.95	18	1.73	6.50	1.39	9	
4	02.04.26	00-51-40.26	1.36	42.94	45.05	24	1.69	8.36	2.42	11	

Таблица 2 (Продолжение)

5	02.04.26	01-33-22.03	0.29	43.07	46.78	6	1.71	5.27	0.71	9	
6	02.04.26	01-39-42.71	0.07	41.44	48.15	6	1.74	8.03	2.24	11	
7	02.04.26	07-50-42.02	0.50	42.88	46.87	3	1.68	7.60	2.00	9	
8	02.04.26	10-20-29.36	1.63	42.89	46.96	24	1.55	4.04	0.02	5	
9	02.04.26	17-37-20.36	0.04	42.26	47.77	15	1.73	6.53	1.40	8	
10	02.04.26	20-54-41.69	0.63	42.96	47.14	9	1.67	4.92	0.51	5	
11	02.04.26	21-14-55.92	-1.21	40.57	46.80	48	1.76	8.40	2.44	5	
12	03.04.26	10-12-51.62	-0.91	42.88	46.18	6	1.79	5.91	1.06	8	
13	03.04.26	23-13-14.83	0.20	42.89	46.83	3	1.71	5.32	0.73	11	
14	03.04.26	23-29-47.84	0.20	42.56	47.99	6	1.73	6.73	1.51	16	
15	03.04.26	23-32-52.37	0.54	42.48	46.94	9	1.68	5.13	0.63	12	
16	03.04.26	23-34-22.30	0.75	42.90	46.43	6	1.68	5.54	0.85	9	
17	04.04.26	01-42-08.51	-0.70	41.76	47.63	60	1.79	5.28	0.71	5	
18	04.04.26	03-27-39.43	-2.70	42.07	49.27	69	1.80	9.53	3.07	16	
19	04.04.26	04-03-39.79	-1.58	41.78	47.59	18	1.88	5.42	0.79	4	
20	04.04.26	04-25-16.81	-1.08	41.02	48.23	48	1.78	7.17	1.76	3	
21	04.04.26	11-55-05.26	-1.98	40.47	48.91	69	1.78	8.65	2.58	4	
22	04.04.26	12-58-44.88	-2.37	42.49	45.74	30	1.82	7.75	2.08	10	
23	04.04.26	13-00-24.77	0.77	42.56	46.21	9	1.68	5.99	1.10	8	
24	04.04.26	22-31-17.47	-2.96	41.92	48.64	75	1.83	7.19	1.77	7	
25	05.04.26	18-05-57.38	0.40	42.99	46.09	6	1.71	6.92	1.62	8	
26	06.04.26	07-08-50.79	-0.35	42.77	47.80	18	1.75	6.88	1.60	9	
27	06.04.26	09-08-21.41	-0.93	41.84	46.30	15	1.77	6.53	1.41	7	
28	06.04.26	19-31-26.89	-0.52	41.85	47.63	24	1.75	7.47	1.93	10	
29	06.04.26	19-51-34.60	0.12	42.45	45.69	18	1.72	5.82	1.01	5	
30	06.04.26	20-05-12.72	-0.96	42.44	45.68	18	1.78	6.07	1.15	6	
31	06.04.26	22-56-53.45	-1.32	41.41	48.41	69	1.77	8.59	2.55	9	Азербайджан
32	07.04.26	04-22-20.18	-0.51	42.67	46.87	3	1.85	4.22	0.12	4	
33	07.04.26	09-33-35.60	-1.26	42.71	44.45	54	1.76	7.64	2.02	6	
34	08.04.26	06-21-45.86	-0.29	43.04	47.00	15	1.76	4.53	0.30	4	
35	08.04.26	08-18-19.18	-2.47	43.64	45.07	54	1.79	7.89	2.16	7	
36	08.04.26	11-08-00.16	-0.45	40.88	46.84	30	1.74	8.72	2.62	8	
37	08.04.26	13-22-12.29	-0.08	41.96	46.38	18	1.74	6.10	1.16	4	
38	08.04.26	14-03-21.92	-0.78	43.66	45.27	48	1.75	7.61	2.00	6	
39	08.04.26	16-32-04.01	-0.05	42.42	45.73	15	1.73	7.50	1.94	8	
40	08.04.26	17-04-43.55	1.26	42.46	45.77	9	1.68	7.97	2.21	10	
41	08.04.26	17-50-18.15	0.53	42.32	45.78	15	1.71	6.20	1.22	6	
42	08.04.26	18-09-27.82	0.06	42.42	45.73	15	1.73	5.72	0.96	5	
43	08.04.26	18-21-01.73	-0.16	42.43	45.76	15	1.74	7.08	1.71	8	
44	08.04.26	19-45-11.50	0.16	42.42	45.76	15	1.72	5.89	1.05	7	
45	08.04.26	20-04-11.38	-0.41	42.47	45.84	9	1.75	6.02	1.12	7	
46	08.04.26	20-13-14.18	-1.12	42.46	45.68	18	1.78	7.21	1.78	9	
47	08.04.26	20-17-29.67	0.57	42.49	45.76	15	1.70	5.34	0.75	5	
48	08.04.26	20-21-16.34	0.02	42.49	45.70	18	1.73	6.62	1.45	8	
49	08.04.26	20-23-39.50	1.40	42.43	45.75	9	1.67	5.64	0.91	5	
50	08.04.26	20-25-39.80	0.14	42.37	45.73	15	1.72	5.60	0.89	5	
51	08.04.26	20-26-15.61	0.57	42.46	45.74	18	1.71	7.14	1.75	9	
52	08.04.26	20-28-22.85	-1.65	42.47	45.80	18	1.81	5.63	0.91	6	
53	08.04.26	20-34-44.32	0.62	42.41	45.72	18	1.71	9.40	3.00	14	Дагестан-Чечня-Грузия
54	08.04.26	20-35-27.92	-0.66	42.45	45.85	9	1.76	7.70	2.05	8	
55	08.04.26	20-38-22.79	1.24	42.51	45.69	18	1.68	6.70	1.50	8	
56	08.04.26	20-39-27.90	0.70	42.39	45.68	18	1.70	6.26	1.26	6	
57	08.04.26	20-41-40.16	0.04	42.46	45.90	18	1.73	9.25	2.91	13	Дагестан-Чечня-Грузия
58	08.04.26	20-45-56.44	-0.90	42.45	45.65	18	1.77	7.47	1.93	9	
59	08.04.26	20-55-09.25	-0.46	42.36	45.76	9	1.75	5.55	0.86	5	
60	08.04.26	21-01-34.27	2.84	42.49	45.48	15	1.62	6.10	1.17	7	
61	08.04.26	21-02-50.66	1.11	42.43	45.61	15	1.68	6.25	1.25	7	
62	08.04.26	21-04-05.36	-0.22	42.43	45.64	15	1.74	6.01	1.12	7	
63	08.04.26	21-11-36.48	1.13	42.42	45.69	9	1.68	6.66	1.48	7	
64	08.04.26	21-15-04.95	-1.79	42.36	45.72	9	1.82	7.23	1.79	9	
65	08.04.26	21-20-20.38	0.49	42.43	45.76	9	1.71	9.30	2.95	13	Дагестан-Чечня-Грузия
66	08.04.26	21-30-28.50	-0.46	42.44	45.77	15	1.75	6.09	1.16	7	

Таблица 2 (Продолжение)

67	08.04.26	21-33-27.31	0.08	42.42	45.70	12	1.73	5.63	0.90	4	
68	08.04.26	21-34-38.53	-0.09	42.42	45.77	15	1.74	5.85	1.03	6	
69	08.04.26	21-37-49.16	0.10	42.48	45.80	15	1.73	5.59	0.88	6	
70	08.04.26	21-38-14.78	1.53	42.43	45.65	18	1.67	5.57	0.87	5	
71	08.04.26	21-44-45.70	0.14	42.47	45.73	18	1.73	6.82	1.57	9	
72	08.04.26	21-46-49.27	-0.56	42.38	45.69	9	1.76	7.38	1.88	9	
73	08.04.26	21-49-46.40	-0.98	42.39	45.69	9	1.77	9.11	2.84	12	Дагестан-Чечня-Грузия
74	08.04.26	21-57-11.41	1.18	42.38	45.62	15	1.68	6.39	1.33	9	
75	08.04.26	22-04-03.76	2.24	42.55	45.67	9	1.64	5.67	0.93	5	
76	08.04.26	22-09-42.97	0.01	42.45	45.65	18	1.73	6.88	1.60	9	
77	08.04.26	22-24-59.47	0.95	42.43	45.74	15	1.69	5.76	0.98	6	
78	08.04.26	22-26-53.03	-0.57	42.48	45.65	18	1.76	6.44	1.35	9	
79	08.04.26	22-36-25.76	0.35	42.46	45.69	18	1.71	6.12	1.18	7	
80	08.04.26	22-50-17.69	-0.77	42.45	45.70	9	1.76	10.02	3.34	12	Дагестан-Чечня-Грузия
81	08.04.26	22-56-08.52	0.56	42.50	45.67	18	1.71	6.54	1.41	9	
82	08.04.26	23-18-45.20	-0.65	42.44	45.69	18	1.76	6.79	1.55	9	
83	08.04.26	23-52-43.58	-0.40	42.46	45.71	18	1.75	5.51	0.84	6	
84	08.04.26	23-56-11.52	0.27	42.47	45.71	18	1.72	5.95	1.08	6	
85	09.04.26	03-02-49.15	0.17	42.45	45.67	9	1.72	5.92	1.07	9	
86	09.04.26	03-20-36.00	0.24	42.41	45.67	9	1.72	6.29	1.27	8	
87	09.04.26	03-26-33.44	-0.64	42.46	45.72	9	1.76	6.80	1.55	9	
88	09.04.26	05-11-09.58	-0.09	42.40	45.79	9	1.73	6.63	1.46	9	
89	09.04.26	05-12-37.83	-0.45	42.42	45.69	15	1.75	9.61	3.12	12	Дагестан-Чечня-Грузия
90	09.04.26	05-21-30.27	-0.88	42.45	45.67	9	1.77	6.95	1.64	8	
91	09.04.26	05-26-30.98	-0.71	42.43	45.74	9	1.76	6.55	1.41	8	
92	09.04.26	05-31-10.89	-0.05	42.45	45.68	9	1.73	6.73	1.52	7	
93	09.04.26	06-22-34.42	-0.98	42.46	45.74	9	1.77	6.44	1.36	8	
94	09.04.26	06-58-23.29	-0.82	42.53	45.73	9	1.76	7.26	1.81	9	
95	09.04.26	07-07-07.38	-0.65	42.47	45.74	9	1.76	6.19	1.22	7	
96	09.04.26	07-10-18.69	-0.54	42.47	45.77	9	1.76	6.30	1.28	7	
97	09.04.26	08-39-26.06	0.82	42.94	47.03	9	1.65	5.31	0.73	7	
98	09.04.26	12-02-12.43	0.15	42.42	45.70	9	1.72	6.73	1.52	9	
99	09.04.26	13-28-35.43	0.80	42.44	45.67	9	1.70	7.96	2.20	10	
100	09.04.26	16-23-07.36	-0.27	42.34	45.74	15	1.74	6.58	1.43	9	
101	09.04.26	18-41-46.02	0.00	42.42	45.66	18	1.73	6.63	1.46	9	
102	09.04.26	18-42-45.04	-0.94	42.41	45.73	9	1.77	6.53	1.41	8	
103	09.04.26	20-52-46.49	0.73	41.68	47.40	15	1.68	5.36	0.75	5	
104	09.04.26	21-01-04.40	-0.78	42.48	45.77	9	1.77	6.46	1.37	7	
105	09.04.26	21-05-24.30	-0.02	42.43	45.70	9	1.73	6.81	1.56	9	
106	09.04.26	21-17-27.84	0.00	42.35	45.70	9	1.73	6.46	1.37	8	
107	09.04.26	21-48-38.46	-0.09	42.43	45.69	9	1.73	7.51	1.95	10	
108	09.04.26	22-33-42.57	-0.28	42.38	45.77	9	1.74	5.96	1.09	9	
109	09.04.26	22-52-08.76	-0.58	42.42	45.68	9	1.75	6.65	1.47	9	
110	09.04.26	23-39-02.47	-0.23	42.44	45.69	9	1.74	7.59	2.00	11	
111	09.04.26	23-46-16.83	-0.27	42.47	45.70	9	1.74	7.57	1.98	10	
112	10.04.26	00-11-13.99	0.61	42.46	45.62	24	1.71	5.77	0.98	8	
113	10.04.26	00-20-33.06	-0.87	42.51	45.68	60	1.77	5.55	0.86	7	
114	10.04.26	04-05-08.05	-3.51	38.72	49.78	30	1.77	9.39	3.00	8	
115	10.04.26	05-52-55.00	-2.00	43.15	45.94	15	1.81	8.33	2.41	13	
116	10.04.26	06-59-36.01	2.14	42.06	46.40	69	1.62	6.42	1.35	7	
117	10.04.26	16-10-17.44	-1.50	42.49	45.76	48	1.80	6.57	1.43	9	
118	10.04.26	16-39-02.37	-0.99	42.46	45.75	48	1.78	6.81	1.56	9	
119	11.04.26	01-07-34.72	-0.90	42.12	46.70	3	1.78	5.68	0.93	7	
120	11.04.26	02-18-05.59	0.13	42.48	45.72	18	1.73	7.68	2.04	9	
121	11.04.26	15-10-19.67	0.55	41.89	48.35	33	1.70	6.96	1.65	3	
122	11.04.26	20-00-43.24	-0.02	42.68	46.95	18	1.73	5.37	0.76	10	
123	11.04.26	22-11-40.85	-0.19	43.09	46.90	15	1.75	4.66	0.37	5	
124	12.04.26	11-44-07.47	-0.19	42.45	45.69	18	1.74	6.67	1.48	9	
125	12.04.26	14-08-13.69	-2.44	43.74	43.85	10	1.78	9.07	2.82	7	
126	12.04.26	17-13-34.66	-4.19	43.42	44.63	69	1.84	8.60	2.56	9	
127	12.04.26	18-46-04.23	-4.73	38.86	49.88	27	1.79	11.62	4.23	11	
128	13.04.26	01-37-32.04	0.23	43.07	46.94	9	1.71	6.47	1.37	7	

Таблица 2 (Продолжение)

129	13.04.26	01-40-08.30	0.37	43.05	46.97	9	1.70	6.13	1.18	7	
130	13.04.26	01-48-07.30	0.67	43.06	46.97	9	1.66	4.64	0.36	6	
131	13.04.26	01-50-05.48	0.04	43.05	46.89	15	1.73	7.10	1.72	10	
132	13.04.26	01-51-28.48	0.01	43.07	46.88	15	1.73	5.43	0.80	10	
133	13.04.26	01-52-09.62	0.80	43.07	46.97	6	1.65	4.96	0.53	6	
134	13.04.26	01-53-03.29	0.24	43.06	46.95	9	1.72	7.36	1.87	10	
135	13.04.26	01-58-24.67	-1.06	43.20	46.37	33	1.79	5.49	0.83	6	
136	13.04.26	02-01-48.09	0.42	43.06	46.97	9	1.69	4.73	0.40	6	
137	13.04.26	02-26-24.96	0.10	41.61	47.79	15	1.72	5.30	0.72	4	
138	13.04.26	03-18-50.13	-0.64	42.48	45.64	18	1.76	7.48	1.94	9	
139	13.04.26	07-17-54.90	-0.85	41.10	45.80	54	1.75	8.89	2.72	8	Азербайджан
140	13.04.26	15-36-34.69	0.94	43.37	47.21	9	1.68	5.94	1.08	5	
141	13.04.26	15-47-40.63	-0.08	43.07	46.87	15	1.74	4.46	0.26	6	
142	13.04.26	15-48-07.29	0.48	43.07	46.93	15	1.68	4.66	0.37	6	
143	13.04.26	18-10-43.06	-0.09	43.04	46.94	9	1.74	4.46	0.26	6	
144	13.04.26	18-26-35.36	0.27	43.07	46.93	15	1.70	4.48	0.26	6	
145	13.04.26	18-29-21.06	-0.35	43.06	46.93	9	1.77	4.63	0.35	6	
146	13.04.26	19-07-53.22	-5.05	40.09	46.25	50	1.86	7.74	2.08	4	
147	13.04.26	20-21-38.56	-1.88	40.08	46.24	50	1.77	8.52	2.51	4	
148	13.04.26	23-34-33.84	0.08	43.06	46.89	15	1.72	5.12	0.62	6	
149	13.04.26	23-38-04.88	0.33	43.05	46.95	9	1.69	4.65	0.36	6	
150	14.04.26	00-33-21.67	0.00	42.43	45.70	15	1.73	7.25	1.81	14	
151	14.04.26	01-16-06.71	-0.40	42.41	47.89	6	1.75	6.54	1.41	15	
152	14.04.26	02-02-13.95	-0.74	41.25	47.90	18	1.77	6.76	1.53	5	
153	14.04.26	03-11-15.40	0.26	42.68	46.79	6	1.73	6.79	1.55	15	
154	14.04.26	05-19-31.57	-1.54	42.24	47.85	3	1.81	10.16	3.42	16	Южный Дагестан
155	14.04.26	06-09-19.74	2.04	41.88	48.03	9	1.60	6.45	1.36	5	
156	14.04.26	19-17-31.06	0.43	42.61	47.42	18	1.70	5.30	0.72	7	
157	14.04.26	21-30-56.52	0.27	43.01	47.16	18	1.72	5.89	1.05	11	
158	14.04.26	21-44-15.28	1.09	42.55	45.81	18	1.69	6.65	1.47	9	
159	14.04.26	23-54-10.67	0.82	42.43	46.44	15	1.67	5.49	0.83	9	
160	15.04.26	00-51-52.56	0.31	41.55	47.93	6	1.71	5.44	0.80	5	
161	15.04.26	01-08-32.54	-0.22	42.77	47.87	6	1.74	6.34	1.30	12	
162	15.04.26	10-11-08.92	-0.06	40.61	46.87	33	1.73	8.18	2.32	5	
163	15.04.26	10-13-35.51	-1.46	40.69	46.91	54	1.77	8.38	2.43	5	
164	15.04.26	13-17-15.08	-0.43	42.54	46.38	6	1.76	9.56	3.09	14	Юго-западный Дагестан
165	15.04.26	16-10-36.38	-1.40	40.77	46.77	30	1.77	8.90	2.72	8	
166	15.04.26	21-52-37.45	-0.08	41.01	48.88	24	1.73	7.32	1.84	4	
167	16.04.26	03-11-28.56	-0.93	43.28	45.82	18	1.76	6.66	1.48	10	
168	16.04.26	12-39-10.94	-1.12	42.43	46.08	3	1.80	5.77	0.99	8	
169	16.04.26	20-10-50.53	-0.07	42.56	47.83	15	1.74	6.12	1.18	8	
170	16.04.26	21-38-16.18	-0.16	42.55	47.88	15	1.74	5.93	1.07	8	
171	16.04.26	22-15-35.35	-0.72	42.97	46.79	6	1.85	3.39	-0.34	4	
172	16.04.26	22-18-24.54	-0.28	42.47	47.91	15	1.75	5.87	1.04	7	
173	16.04.26	22-46-38.32	-0.08	42.35	48.10	15	1.73	5.71	0.95	6	
174	17.04.26	00-11-54.05	-1.03	40.99	47.47	24	1.78	6.66	1.48	3	
175	17.04.26	01-49-58.96	0.21	42.95	46.75	9	1.71	4.92	0.51	5	
176	17.04.26	02-16-24.79	-5.11	40.53	48.82	2	1.85	8.39	2.44	5	
177	17.04.26	03-38-47.83	0.93	43.05	46.66	18	1.65	5.37	0.76	3	
178	17.04.26	11-11-39.60	-1.49	40.46	48.34	48	1.77	8.80	2.67	4	
179	17.04.26	13-55-47.81	-1.51	43.21	45.95	15	1.79	8.20	2.33	9	
180	17.04.26	20-33-14.77	-0.56	42.83	47.93	24	1.75	6.65	1.47	5	
181	17.04.26	21-36-51.78	-4.08	39.05	49.05	35	1.79	9.78	3.21	12	
182	18.04.26	04-43-28.15	-2.98	43.56	45.57	18	1.83	6.59	1.44	7	
183	18.04.26	05-41-53.72	-0.99	42.73	47.60	18	1.81	5.38	0.77	5	
184	18.04.26	09-44-02.80	-0.04	42.58	46.13	24	1.73	5.03	0.57	5	
185	18.04.26	11-33-37.64	0.94	42.71	46.45	9	1.63	4.41	0.23	5	
186	18.04.26	12-58-05.99	0.34	42.63	46.13	24	1.71	5.07	0.59	7	
187	18.04.26	23-02-29.91	-0.05	42.77	47.93	18	1.73	6.27	1.26	8	
188	19.04.26	03-52-27.13	-0.66	42.29	48.31	6	1.77	6.60	1.45	7	
189	19.04.26	06-39-28.51	1.57	43.17	46.00	30	1.66	7.79	2.11	8	
190	19.04.26	07-29-51.14	-0.25	41.66	47.70	24	1.75	7.09	1.72	5	

Информационный раздел

Таблица 2 (Продолжение)

191	19.04.26	08-25-27.43	-0.04	43.14	46.76	18	1.73	5.57	0.87	5	
192	19.04.26	09-06-25.18	0.48	43.03	46.98	15	1.68	4.14	0.08	4	
193	19.04.26	23-50-34.18	0.19	42.30	47.36	15	1.72	5.64	0.91	10	
194	20.04.26	00-01-47.58	-2.17	43.04	46.03	6	1.84	5.78	0.99	8	
195	20.04.26	01-47-54.12	-1.20	42.74	46.39	15	1.81	4.95	0.53	6	
196	20.04.26	03-42-44.09	0.77	41.75	47.49	15	1.69	6.47	1.37	7	
197	20.04.26	05-23-50.11	3.54	42.87	47.12	9	1.45	4.84	0.47	4	
198	20.04.26	05-45-23.47	-0.26	42.84	47.09	18	1.75	5.34	0.74	7	
199	20.04.26	19-36-21.00	0.97	42.06	46.29	18	1.67	6.11	1.17	6	
200	21.04.26	02-00-35.33	-1.25	41.72	48.52	6	1.79	7.32	1.85	7	
201	21.04.26	03-22-30.41	-0.80	40.99	49.34	30	1.75	9.98	3.32	9	
202	21.04.26	09-10-44.64	-0.70	42.88	44.45	48	1.75	8.06	2.25	7	
203	21.04.26	20-09-39.44	0.05	42.95	45.75	9	1.73	6.78	1.54	10	
204	21.04.26	20-27-06.73	1.28	42.31	47.57	6	1.67	7.08	1.71	12	
205	21.04.26	22-29-33.84	-0.09	42.79	45.76	18	1.73	6.42	1.35	7	
206	22.04.26	01-02-14.27	-1.49	41.19	48.60	9	1.80	6.02	1.12	4	
207	22.04.26	10-07-10.46	-5.37	38.89	50.11	65	1.80	9.88	3.27	7	
208	22.04.26	23-00-20.33	-2.31	40.27	46.34	2	1.78	8.07	2.26	6	
209	23.04.26	07-32-04.69	0.09	42.85	47.10	15	1.75	7.84	2.13	14	
210	23.04.26	13-47-21.89	-0.37	42.43	47.89	18	1.75	7.06	1.70	11	
211	23.04.26	17-04-42.98	0.17	42.99	46.80	3	1.70	5.03	0.57	3	
212	23.04.26	19-59-41.55	0.89	42.46	47.67	15	1.72	5.17	0.65	5	
213	23.04.26	21-01-06.72	-0.21	42.81	47.40	15	1.74	6.83	1.57	10	
214	24.04.26	16-00-07.84	0.20	41.61	47.82	15	1.71	6.69	1.49	4	
215	24.04.26	23-35-59.13	0.44	42.78	46.62	60	1.70	5.70	0.95	9	
216	24.04.26	23-38-53.38	0.22	42.79	46.63	6	1.71	4.79	0.44	7	
217	25.04.26	01-19-33.24	-0.46	42.94	46.51	9	1.78	4.52	0.29	5	
218	25.04.26	03-06-20.29	-0.21	42.92	47.13	9	1.76	4.51	0.28	5	
219	25.04.26	10-45-30.93	-0.28	41.93	47.58	15	1.75	6.69	1.49	9	
220	25.04.26	15-57-06.07	-0.63	41.96	48.09	18	1.77	7.18	1.77	9	
221	25.04.26	23-52-37.97	-0.16	42.39	46.33	15	1.74	5.72	0.96	8	
222	26.04.26	08-53-05.72	-1.01	42.77	47.82	24	1.78	7.00	1.67	8	
223	26.04.26	10-17-30.76	-1.00	42.85	47.99	6	1.78	6.55	1.42	8	
224	26.04.26	13-12-20.77	0.32	42.78	47.81	9	1.72	7.06	1.70	7	
225	26.04.26	13-13-51.82	-0.32	42.74	47.82	6	1.75	8.43	2.46	14	
226	26.04.26	13-16-03.58	-1.44	42.70	47.78	6	1.80	6.98	1.65	9	
227	26.04.26	14-18-36.11	-0.50	42.74	47.84	18	1.76	6.73	1.51	6	
228	26.04.26	14-22-38.41	0.15	42.75	48.00	24	1.72	6.81	1.56	7	
229	26.04.26	14-32-22.87	0.42	42.78	48.02	18	1.71	7.36	1.87	10	
230	26.04.26	16-33-57.10	-0.25	42.35	47.78	18	1.74	6.69	1.49	6	
231	26.04.26	19-04-58.59	0.43	42.69	47.93	9	1.71	9.24	2.91	14	Каспийское море
232	26.04.26	23-01-33.07	-0.06	42.69	47.95	24	1.74	6.35	1.30	5	
233	27.04.26	00-02-17.21	-0.28	42.58	48.41	9	1.74	6.61	1.45	11	
234	27.04.26	02-18-09.39	0.31	42.94	47.06	6	1.70	4.34	0.19	5	
235	27.04.26	02-56-30.71	-0.32	42.79	48.01	9	1.74	6.48	1.38	9	
236	27.04.26	06-57-48.29	-1.01	41.96	48.05	39	1.77	6.73	1.52	7	
237	27.04.26	14-58-37.49	-1.00	43.71	45.10	33	1.76	7.86	2.15	7	
238	27.04.26	18-20-47.88	-1.15	41.99	48.95	30	1.77	7.51	1.95	8	
239	27.04.26	18-39-24.39	-0.33	42.81	47.81	6	1.75	6.87	1.59	12	
240	28.04.26	01-17-23.63	-1.74	41.19	48.29	18	1.79	7.06	1.70	9	
241	28.04.26	08-00-10.68	0.49	42.92	47.05	15	1.69	6.23	1.24	8	
242	28.04.26	08-58-48.85	-0.96	42.95	47.13	18	1.86	5.68	0.93	6	
243	28.04.26	12-34-39.53	0.54	42.87	46.95	15	1.65	4.65	0.36	5	
244	28.04.26	15-59-40.82	0.02	42.86	46.97	6	1.72	4.76	0.42	5	
245	29.04.26	02-38-52.66	0.10	41.92	46.34	9	1.72	5.72	0.96	3	
246	29.04.26	08-05-33.50	-2.90	43.83	44.65	18	1.79	7.99	2.22	6	
247	29.04.26	11-00-55.19	-0.53	42.98	47.28	15	1.76	6.24	1.25	10	
248	29.04.26	16-37-02.98	0.32	42.88	46.89	9	1.69	4.06	0.03	5	
249	30.04.26	08-42-21.30	-0.72	40.94	48.17	18	1.76	7.57	1.98	5	
250	30.04.26	11-36-10.99	-0.02	42.90	46.92	15	1.74	6.08	1.16	10	
251	30.04.26	13-23-00.14	0.64	42.45	45.73	18	1.70	7.26	1.81	8	
252	30.04.26	14-04-41.02	0.49	42.91	47.48	18	1.70	7.44	1.91	12	

Таблица 2 (Продолжение)

253	30.04.26	17-23-18.99	0.61	42.42	45.72	9	1.71	7.03	1.68	8	
254	30.04.26	18-00-54.41	0.03	42.41	45.73	9	1.73	5.94	1.08	7	
255	30.04.26	18-50-12.15	-0.54	42.47	45.67	18	1.76	6.00	1.11	7	
256	30.04.26	22-51-10.89	-0.20	42.43	45.69	18	1.74	5.54	0.86	6	
257	30.04.26	23-10-11.89	-0.30	41.87	47.51	24	1.75	6.13	1.18	11	
258	01.05.26	00-56-36.98	-2.33	40.60	48.58	54	1.79	9.16	2.86	6	
259	01.05.26	05-17-32.76	0.19	43.00	46.80	9	1.70	4.59	0.33	5	
260	01.05.26	07-20-25.90	1.20	42.72	46.55	9	1.61	4.41	0.23	6	
261	01.05.26	13-19-21.30	-2.25	42.37	48.84	9	1.82	7.83	2.13	7	
262	01.05.26	14-41-25.33	-1.84	41.47	46.28	18	1.80	7.91	2.17	8	
263	01.05.26	16-27-10.09	0.27	43.01	47.06	6	1.70	4.45	0.25	4	
264	01.05.26	21-46-56.84	-0.36	42.59	48.14	15	1.75	6.64	1.47	9	
265	02.05.26	03-43-34.11	-2.70	41.02	43.73	15	1.78	9.16	2.87	10	
266	02.05.26	05-05-19.51	-0.15	42.80	47.91	18	1.74	7.59	2.00	11	
267	02.05.26	11-10-43.79	0.02	42.34	46.51	24	1.73	5.57	0.87	7	
268	02.05.26	21-39-09.50	-0.04	42.04	46.26	6	1.74	6.89	1.61	11	
269	03.05.26	06-49-30.11	-0.68	42.94	47.07	6	1.83	4.83	0.46	5	
270	03.05.26	13-01-51.10	-0.30	41.51	47.80	6	1.74	6.28	1.26	7	
271	03.05.26	14-34-42.26	-0.43	42.68	46.04	18	1.76	6.19	1.22	10	
272	03.05.26	15-20-24.11	-1.09	42.85	47.09	9	1.89	3.88	-0.07	5	
273	03.05.26	15-52-16.88	-0.59	42.25	45.77	9	1.75	6.48	1.38	9	
274	03.05.26	17-44-42.17	-1.27	41.03	48.51	24	1.77	7.36	1.86	5	
275	03.05.26	20-59-26.87	-0.53	41.65	47.84	15	1.77	6.45	1.36	5	
276	04.05.26	00-50-39.44	1.76	42.58	48.14	24	1.66	7.11	1.73	4	
277	04.05.26	06-14-33.49	-2.61	40.38	44.47	35	1.78	8.20	2.33	6	
278	04.05.26	06-40-08.16	-0.27	42.82	47.90	18	1.74	7.11	1.73	9	
279	04.05.26	11-30-19.60	0.43	42.15	46.08	6	1.71	6.77	1.54	7	
280	04.05.26	22-47-48.83	0.16	42.08	48.02	39	1.72	5.35	0.75	4	
281	04.05.26	23-49-00.82	-2.41	41.06	48.99	24	1.81	7.08	1.71	4	
282	05.05.26	00-04-50.99	-4.17	42.96	47.59	39	1.96	7.20	1.78	10	
283	05.05.26	02-50-04.75	-4.76	44.16	47.37	38	1.80	7.35	1.86	9	
284	05.05.26	02-59-19.43	-3.56	39.80	48.31	3	1.80	8.16	2.31	6	
285	05.05.26	05-06-17.59	-2.33	43.17	45.75	15	1.81	7.32	1.84	9	
286	06.05.26	06-53-59.43	0.00	43.05	46.75	6	1.74	4.15	0.08	5	
287	06.05.26	16-46-50.85	0.53	42.55	46.49	9	1.68	5.48	0.82	7	
288	06.05.26	19-31-52.69	1.05	42.99	46.62	9	1.64	5.45	0.81	10	
289	06.05.26	22-16-23.27	-0.68	41.79	47.31	24	1.78	5.40	0.78	5	
290	07.05.26	00-59-30.30	-0.68	42.96	46.66	6	1.86	3.14	-0.48	4	
291	07.05.26	02-36-52.87	0.32	42.66	47.02	9	1.69	3.85	-0.08	6	
292	07.05.26	07-44-38.98	-1.29	41.93	48.24	18	1.80	8.24	2.36	8	
293	07.05.26	08-33-00.65	0.07	42.75	46.54	6	1.72	4.61	0.34	6	
294	07.05.26	12-47-23.25	0.61	42.90	46.94	6	1.64	5.58	0.88	6	
295	08.05.26	05-59-41.88	2.29	41.91	46.57	6	1.62	5.26	0.70	6	
296	08.05.26	07-26-52.97	2.28	42.76	46.62	3	1.47	4.26	0.14	4	
297	08.05.26	09-14-42.27	-1.66	43.14	45.25	18	1.79	7.73	2.07	9	
298	08.05.26	11-06-29.96	0.69	42.71	47.51	6	1.70	7.61	2.01	13	
299	08.05.26	14-11-59.26	0.07	41.67	47.64	3	1.73	6.05	1.14	4	
300	08.05.26	15-07-25.67	-0.07	42.85	45.89	33	1.73	6.16	1.20	7	
301	09.05.26	02-38-57.90	-1.75	42.94	45.14	18	1.78	7.93	2.18	10	
302	09.05.26	05-56-25.95	-0.93	43.60	45.62	9	1.76	7.58	1.99	7	
303	09.05.26	10-35-12.89	-1.32	40.89	47.51	30	1.77	9.44	3.02	10	
304	09.05.26	14-53-12.33	0.25	42.30	47.94	15	1.72	6.68	1.49	8	
305	09.05.26	17-31-29.43	0.99	42.96	46.99	6	1.62	4.82	0.45	5	
306	10.05.26	02-42-31.13	-0.31	41.83	46.53	60	1.75	7.01	1.67	11	
307	10.05.26	11-46-48.75	-2.46	41.77	45.51	60	1.80	8.66	2.59	11	Грузия
308	10.05.26	21-17-03.07	-0.45	42.96	47.02	9	1.79	4.17	0.09	5	
309	10.05.26	21-40-59.96	-0.08	41.68	47.94	24	1.74	5.19	0.66	3	
310	10.05.26	22-38-16.93	-0.51	43.00	47.22	15	1.76	7.44	1.91	14	
311	10.05.26	22-53-22.45	1.60	42.97	47.24	18	1.63	5.79	0.99	7	
312	11.05.26	01-05-14.45	-0.83	42.73	47.84	15	1.77	7.04	1.69	14	
313	11.05.26	03-15-43.28	-1.28	43.18	45.59	9	1.77	9.66	3.15	14	Чеченская Республика

Таблица 2 (Продолжение)

314	11.05.26	08-08-40.33	-0.29	42.57	45.81	48	1.74	8.16	2.31	11	
315	11.05.26	12-20-27.27	0.49	42.97	46.94	18	1.70	6.25	1.25	8	
316	11.05.26	17-35-51.30	0.17	42.93	46.86	3	1.72	5.96	1.09	9	
317	12.05.26	00-08-17.29	0.23	42.91	46.61	6	1.70	4.13	0.07	5	
318	12.05.26	13-40-01.66	-1.02	42.40	46.36	54	1.79	5.81	1.01	8	
319	12.05.26	16-59-19.25	-0.60	42.23	48.02	3	1.76	7.10	1.72	13	
320	13.05.26	05-11-25.84	-0.18	42.65	47.56	9	1.74	6.61	1.45	9	
321	13.05.26	08-53-10.20	-0.58	42.33	47.90	24	1.76	7.03	1.68	9	
322	13.05.26	16-00-37.18	0.52	42.18	47.87	15	1.70	6.37	1.32	8	
323	13.05.26	21-08-22.10	0.32	42.80	46.33	24	1.71	4.99	0.55	7	
324	13.05.26	23-05-04.07	-0.10	42.91	47.26	18	1.74	5.21	0.67	6	
325	13.05.26	23-20-37.92	-1.19	42.84	46.64	9	1.93	3.47	-0.29	5	
326	14.05.26	07-42-35.34	0.32	42.64	46.94	6	1.70	4.18	0.10	6	
327	14.05.26	07-52-05.26	-0.41	42.43	45.85	6	1.75	5.34	0.74	6	
328	14.05.26	09-50-02.55	-2.94	43.15	44.94	33	1.82	7.40	1.89	6	
329	14.05.26	18-04-05.49	-2.86	42.95	44.96	54	1.82	7.29	1.83	7	
330	14.05.26	22-16-33.66	0.41	42.04	46.21	6	1.72	7.00	1.66	11	
331	14.05.26	22-59-58.48	-0.89	42.05	46.24	6	1.78	6.39	1.33	9	
332	15.05.26	03-25-01.06	0.57	43.04	47.37	3	1.70	7.10	1.72	10	
333	15.05.26	03-34-48.72	0.70	43.03	47.34	3	1.68	5.51	0.84	7	
334	15.05.26	04-19-24.48	-0.30	41.57	47.73	15	1.75	6.77	1.54	7	
335	15.05.26	07-04-32.15	-0.34	42.48	46.29	15	1.75	6.60	1.44	11	
336	16.05.26	02-04-06.78	-2.52	42.92	45.90	39	1.84	5.92	1.07	7	
337	16.05.26	08-30-17.18	-4.78	41.97	47.77	24	2.15	6.50	1.39	3	
338	16.05.26	09-30-41.55	0.06	42.15	47.94	3	1.73	7.03	1.68	8	
339	16.05.26	15-30-55.69	0.54	42.98	46.23	3	1.70	6.63	1.46	7	
340	16.05.26	19-38-14.54	-4.69	43.54	44.98	63	1.84	8.07	2.26	5	
341	16.05.26	20-22-58.61	1.26	41.71	47.57	48	1.63	5.87	1.04	4	
342	16.05.26	21-03-11.54	-0.22	42.45	47.99	6	1.74	5.91	1.06	8	
343	16.05.26	21-55-16.38	-2.91	43.88	45.04	48	1.80	7.69	2.05	5	
344	16.05.26	22-31-00.75	-0.91	41.85	48.58	69	1.78	5.91	1.06	5	
345	17.05.26	21-50-34.01	-0.39	42.47	45.74	48	1.75	7.76	2.09	12	
346	17.05.26	23-51-50.60	-2.15	41.84	49.05	30	1.79	8.51	2.51	14	
347	18.05.26	03-34-02.87	0.84	43.21	46.25	15	1.68	5.61	0.89	6	
348	18.05.26	03-35-30.27	0.21	43.13	46.23	6	1.72	5.81	1.01	8	
349	18.05.26	04-57-38.16	-2.55	40.74	48.11	30	1.80	8.23	2.35	9	
350	18.05.26	12-13-18.27	-3.72	44.10	45.46	33	1.83	8.83	2.68	9	Дагестан-Ставрополье
351	18.05.26	12-29-00.30	0.55	43.10	47.00	15	1.68	5.62	0.90	5	
352	18.05.26	18-09-50.00	-0.74	42.76	48.05	9	1.76	6.86	1.59	9	
353	18.05.26	22-34-35.85	-0.40	42.35	46.57	9	1.77	4.15	0.08	4	
354	19.05.26	06-21-41.30	-0.61	42.16	48.03	15	1.77	6.33	1.29	7	
355	19.05.26	07-24-05.54	-0.66	41.54	46.73	24	1.76	7.37	1.87	9	
356	19.05.26	07-36-30.15	-0.70	42.98	46.62	6	1.85	4.66	0.37	4	
357	19.05.26	09-38-37.92	0.39	42.90	46.91	9	1.70	7.92	2.18	11	
358	19.05.26	14-55-45.53	0.15	41.78	48.38	48	1.72	7.33	1.85	6	
359	19.05.26	17-14-58.66	-0.19	42.98	47.10	9	1.76	3.99	-0.01	4	
360	19.05.26	17-29-40.79	0.21	42.83	46.96	6	1.69	4.67	0.37	5	
361	19.05.26	18-26-30.31	0.51	42.66	46.39	9	1.69	5.36	0.76	8	
362	19.05.26	22-18-07.16	-2.67	44.23	45.54	69	1.80	7.82	2.12	5	
363	19.05.26	23-51-18.55	-1.84	40.92	48.48	18	1.79	7.28	1.82	6	
364	20.05.26	02-12-53.26	0.37	42.53	46.72	15	1.80	5.09	0.61	7	
365	20.05.26	02-25-04.36	-2.20	43.12	45.66	9	1.82	7.94	2.19	11	
366	20.05.26	17-41-17.38	-1.13	42.23	46.14	6	1.78	8.25	2.36	16	
367	21.05.26	00-52-38.28	0.39	41.66	47.69	3	1.70	5.59	0.88	7	
368	21.05.26	01-25-29.73	-0.45	42.32	47.95	3	1.75	7.28	1.82	14	
369	21.05.26	01-34-09.62	-0.37	41.80	48.14	15	1.75	6.69	1.49	12	
370	21.05.26	16-40-36.64	0.43	42.79	46.47	9	1.69	5.24	0.69	6	
371	21.05.26	23-59-56.06	-1.15	41.15	43.90	2	1.75	8.25	2.36	7	
372	22.05.26	00-46-15.12	1.43	42.92	47.05	15	1.59	4.26	0.14	6	
373	22.05.26	01-31-03.76	-1.54	41.79	48.25	48	1.85	5.68	0.93	5	
374	23.05.26	05-04-30.91	0.25	42.23	48.03	3	1.72	8.98	2.77	15	Юго-восточный Дагестан

Таблица 2 (Продолжение)

375	23.05.26	06-42-01.16	0.60	43.09	46.73	18	1.68	6.70	1.50	6	
376	23.05.26	07-58-51.43	2.07	42.65	46.87	3	1.44	4.21	0.12	4	
377	23.05.26	22-56-24.40	-0.62	42.55	46.39	30	1.78	5.46	0.81	7	
378	24.05.26	00-37-18.89	0.49	41.66	47.66	60	1.69	5.91	1.06	5	
379	24.05.26	02-26-59.69	0.66	43.12	46.76	6	1.62	3.82	-0.10	4	
380	24.05.26	07-25-36.30	0.14	43.09	46.76	6	1.72	5.05	0.59	5	
381	24.05.26	16-20-54.58	0.83	42.12	47.78	6	1.68	6.23	1.24	8	
382	24.05.26	19-57-18.83	-0.10	41.73	47.57	9	1.73	6.00	1.11	6	
383	24.05.26	23-02-49.99	-4.59	43.17	43.69	4	1.82	8.20	2.33	8	
384	25.05.26	02-36-11.69	0.09	41.90	46.19	18	1.73	6.38	1.32	8	
385	26.05.26	13-12-03.35	1.40	42.75	46.61	39	1.66	5.58	0.88	8	
386	27.05.26	05-57-46.48	0.68	42.97	46.60	3	1.69	7.44	1.91	11	
387	27.05.26	10-48-24.05	0.48	41.69	47.66	3	1.71	6.50	1.39	7	
388	27.05.26	20-16-24.31	-0.95	43.09	45.85	9	1.77	10.30	3.50	13	Чеченская Республика
389	28.05.26	00-01-58.33	-1.19	42.15	48.86	15	1.77	8.90	2.72	14	Каспийское море
390	28.05.26	14-29-36.96	0.46	42.04	46.92	6	1.71	6.54	1.41	5	
391	28.05.26	18-00-56.18	-0.82	41.93	47.91	24	1.78	6.43	1.35	9	
392	30.05.26	03-35-22.02	-1.77	42.70	45.50	48	1.80	6.36	1.31	5	
393	30.05.26	07-38-07.83	0.28	42.43	47.88	15	1.71	6.77	1.54	5	
394	30.05.26	23-33-10.28	0.09	41.59	48.03	6	1.73	5.34	0.74	5	
395	31.05.26	03-45-21.13	0.19	42.44	46.39	15	1.72	5.37	0.76	8	
396	31.05.26	04-40-18.80	0.42	42.95	46.67	6	1.68	4.56	0.31	4	
397	31.05.26	10-24-27.22	-0.81	42.91	47.03	9	1.87	4.12	0.07	4	
398	01.06.26	04-02-06.52	-0.63	43.13	46.34	30	1.77	5.15	0.64	7	
399	01.06.26	07-02-14.44	1.50	41.95	46.43	24	1.66	6.28	1.27	6	
400	01.06.26	12-47-39.84	-2.54	43.37	45.09	30	1.80	8.62	2.57	8	Чечня-Ингушетия
401	01.06.26	13-01-43.46	-3.34	42.91	44.93	54	1.84	7.62	2.01	6	
402	01.06.26	14-38-54.22	-0.09	42.61	47.55	15	1.74	6.02	1.12	7	
403	01.06.26	14-54-05.67	0.13	42.99	46.60	6	1.73	8.55	2.53	11	Центральный Дагестан
404	01.06.26	23-53-07.63	-0.46	42.89	46.76	3	1.83	3.41	-0.33	4	
405	02.06.26	00-11-54.58	-0.58	41.64	47.78	18	1.78	6.61	1.45	9	
406	02.06.26	03-52-56.99	0.95	42.85	45.79	18	1.69	6.60	1.45	10	
407	02.06.26	11-17-50.45	0.47	42.23	48.38	15	1.71	6.49	1.38	6	
408	02.06.26	13-42-46.00	-1.17	41.07	47.81	18	1.78	7.16	1.76	5	
409	03.06.26	00-42-07.87	-0.12	41.82	47.45	24	1.74	5.40	0.78	4	
410	03.06.26	19-38-27.44	-2.88	40.81	50.55	17	1.78	9.48	3.05	5	
411	04.06.26	01-37-55.66	0.95	42.97	46.97	9	1.63	4.51	0.28	6	
412	04.06.26	01-47-12.68	0.26	42.96	47.13	9	1.70	4.42	0.23	6	
413	04.06.26	02-30-41.85	-0.56	39.86	51.08	22	1.74	11.14	3.97	5	
414	04.06.26	06-54-11.25	0.09	43.23	46.57	9	1.73	6.78	1.54	9	
415	04.06.26	08-45-41.14	-0.31	42.50	45.56	9	1.74	6.51	1.39	6	
416	04.06.26	18-56-39.76	0.62	42.43	47.79	18	1.70	6.37	1.31	5	
417	05.06.26	02-41-55.70	-0.56	41.87	46.34	18	1.75	6.83	1.57	8	
418	05.06.26	22-35-49.68	-0.22	42.98	46.72	6	1.77	4.27	0.15	4	
419	06.06.26	00-16-51.94	1.80	42.94	46.55	6	1.59	4.58	0.32	6	
420	06.06.26	00-45-33.94	2.81	42.22	45.64	9	1.64	6.83	1.57	10	
421	06.06.26	01-26-55.42	2.29	42.81	46.72	6	1.51	3.76	-0.13	6	
422	06.06.26	03-17-05.08	0.54	41.63	47.71	24	1.71	6.97	1.65	12	
423	06.06.26	13-41-53.68	-0.54	42.81	48.12	24	1.75	7.62	2.01	13	
424	06.06.26	16-05-18.30	0.99	42.25	46.08	24	1.69	7.33	1.85	9	
425	06.06.26	18-45-46.68	0.51	42.67	47.40	9	1.69	5.59	0.89	8	
426	06.06.26	20-36-18.71	-0.60	41.04	48.35	24	1.75	7.30	1.84	6	
427	07.06.26	03-01-42.63	-0.37	42.82	46.89	3	1.81	3.28	-0.40	5	
428	07.06.26	09-24-31.17	-0.06	43.37	46.85	15	1.73	6.23	1.24	6	
429	07.06.26	12-45-28.33	2.24	40.31	49.28	48	1.68	10.17	3.43	5	
430	07.06.26	13-53-18.42	0.84	42.92	47.10	9	1.65	4.96	0.53	6	
431	07.06.26	15-11-11.13	-0.95	42.63	47.92	6	1.77	6.86	1.59	11	
432	07.06.26	18-14-11.11	0.42	43.13	47.02	9	1.69	5.48	0.82	6	
433	07.06.26	18-35-04.12	0.21	43.08	46.95	6	1.73	6.50	1.39	12	
434	07.06.26	18-46-28.56	-0.41	43.10	46.98	9	1.76	5.52	0.84	9	
435	07.06.26	20-11-34.62	0.56	42.56	46.53	9	1.69	6.24	1.24	11	
436	08.06.26	01-36-58.42	0.08	42.87	46.58	6	1.72	4.80	0.45	6	

Таблица 2 (Продолжение)

437	08.06.26	03-20-26.24	-0.28	41.96	47.57	15	1.75	5.34	0.75	6	
438	08.06.26	09-43-01.01	2.07	41.80	47.77	3	1.58	4.87	0.48	4	
439	08.06.26	22-48-02.65	1.32	42.97	47.14	6	1.60	4.85	0.47	4	
440	08.06.26	23-28-37.36	-1.48	41.54	49.16	54	1.78	6.78	1.55	3	
441	09.06.26	11-58-27.60	0.12	43.08	46.81	3	1.72	7.05	1.69	10	
442	09.06.26	11-58-49.96	-0.61	43.10	46.99	6	1.85	5.19	0.66	4	
443	09.06.26	12-00-20.77	0.53	43.13	46.83	6	1.67	5.57	0.87	6	
444	09.06.26	12-18-33.36	0.73	43.14	46.83	9	1.65	5.62	0.90	6	
445	09.06.26	16-09-51.48	-1.10	41.31	43.80	10	1.75	8.56	2.53	4	
446	10.06.26	01-04-59.53	-0.19	43.12	46.03	18	1.74	5.81	1.01	8	
447	10.06.26	02-55-00.15	-3.06	43.72	44.85	54	1.81	7.81	2.12	7	
448	10.06.26	02-57-09.33	-1.81	43.83	44.15	2	1.77	7.69	2.05	7	
449	10.06.26	05-04-36.91	-1.33	41.94	46.79	33	1.81	5.80	1.00	9	
450	10.06.26	06-51-50.19	-1.57	42.94	48.04	18	1.79	7.43	1.90	13	
451	10.06.26	07-29-48.15	0.28	42.84	47.07	15	1.69	4.21	0.12	5	
452	10.06.26	11-01-09.29	-0.45	41.37	48.25	24	1.75	8.46	2.48	6	
453	10.06.26	11-02-32.59	-0.94	41.41	48.26	24	1.78	7.56	1.98	6	
454	10.06.26	11-18-00.01	-1.00	41.37	48.26	9	1.77	6.84	1.58	6	
455	10.06.26	21-50-30.59	0.04	42.48	45.65	18	1.73	7.78	2.10	11	
456	11.06.26	02-29-11.79	-3.40	42.78	45.87	30	1.93	6.44	1.35	10	
457	11.06.26	16-42-41.41	1.07	41.98	46.27	18	1.68	6.41	1.34	9	
458	11.06.26	19-15-01.98	-0.14	42.84	47.20	9	1.74	5.33	0.74	7	
459	12.06.26	00-01-33.49	-0.39	41.70	47.76	6	1.76	5.34	0.74	7	
460	12.06.26	05-18-17.54	-1.27	40.86	48.30	18	1.77	8.19	2.33	7	
461	12.06.26	07-08-14.68	-0.61	41.11	47.86	9	1.76	6.79	1.55	6	
462	12.06.26	10-15-01.41	-0.79	41.50	46.09	18	1.76	7.11	1.73	8	
463	12.06.26	11-13-10.15	-2.39	40.86	47.86	18	1.79	13.00	5.00	15	
464	12.06.26	13-32-45.04	-0.87	40.94	47.96	24	1.76	7.43	1.91	5	
465	12.06.26	14-15-41.08	-2.03	40.84	47.94	18	1.79	9.09	2.83	11	
466	13.06.26	05-22-20.65	2.08	43.05	47.06	15	1.49	5.30	0.72	3	
467	13.06.26	08-00-59.77	-1.96	40.85	47.97	24	1.78	8.53	2.52	10	
468	13.06.26	15-33-15.90	0.07	42.72	46.46	9	1.73	4.70	0.39	7	
469	13.06.26	22-27-42.38	-0.04	43.04	46.77	6	1.73	4.90	0.50	7	
470	14.06.26	02-44-43.13	0.12	42.85	46.96	6	1.72	2.97	-0.57	5	
471	14.06.26	11-14-00.09	-1.21	43.21	46.06	69	1.79	6.17	1.20	5	
472	14.06.26	20-32-03.05	0.69	42.90	48.49	24	1.71	7.49	1.94	6	
473	14.06.26	21-55-43.79	-0.45	42.90	45.69	9	1.75	6.15	1.19	7	
474	15.06.26	07-15-11.20	-3.38	40.04	46.76	22	1.81	8.31	2.39	5	
475	15.06.26	08-12-41.06	-1.19	41.38	48.38	6	1.78	8.40	2.45	7	
476	15.06.26	11-48-50.85	-0.14	42.84	46.21	18	1.74	6.46	1.37	10	
477	15.06.26	23-46-37.11	-2.35	40.58	46.86	69	1.80	7.15	1.75	5	
478	16.06.26	04-23-08.85	0.52	42.86	46.38	3	1.71	9.26	2.92	17	Центральный Дагестан
479	16.06.26	06-59-09.52	1.16	42.84	46.37	6	1.64	5.14	0.63	7	
480	17.06.26	05-58-56.67	-0.41	43.00	46.67	9	1.78	5.17	0.65	7	
481	17.06.26	08-42-47.75	-1.73	43.36	45.29	18	1.78	8.06	2.26	8	
482	17.06.26	09-24-07.74	0.75	42.90	45.59	9	1.70	7.65	2.03	10	
483	17.06.26	12-07-44.91	-0.13	42.07	46.48	3	1.74	6.50	1.39	10	
484	17.06.26	12-38-18.50	-0.79	43.24	46.40	6	1.77	6.96	1.64	10	
485	17.06.26	13-58-28.56	0.11	43.22	46.37	6	1.73	7.15	1.75	11	
486	17.06.26	16-34-33.75	-2.00	41.64	48.99	9	1.79	8.33	2.41	9	
487	17.06.26	23-25-30.18	-0.29	42.10	47.81	6	1.75	6.61	1.45	14	
488	17.06.26	23-56-00.62	0.29	42.45	46.28	6	1.71	5.38	0.77	8	
489	18.06.26	03-57-18.40	-2.02	43.64	45.53	39	1.79	6.93	1.63	4	
490	18.06.26	04-21-14.76	0.30	42.40	47.53	6	1.72	5.42	0.79	6	
491	18.06.26	22-09-38.75	0.77	42.74	46.07	30	1.69	5.51	0.84	7	
492	19.06.26	00-34-45.26	-1.11	42.92	47.05	9	1.90	4.04	0.02	5	
493	19.06.26	15-17-43.98	0.08	40.25	45.93	5	1.73	9.94	3.30	8	
494	19.06.26	22-22-46.44	0.26	42.89	45.49	9	1.72	6.69	1.49	7	
495	19.06.26	23-16-51.11	-0.19	42.81	47.96	24	1.74	7.04	1.69	8	
496	19.06.26	23-27-55.55	0.28	42.76	47.90	18	1.72	7.65	2.03	14	
497	19.06.26	23-38-50.92	-0.43	42.76	47.92	24	1.75	6.82	1.56	12	

Таблица 2 (Продолжение)

498	19.06.26	23-39-37.39	-1.73	42.70	47.90	6	1.81	6.97	1.65	11	
499	20.06.26	00-59-57.00	-3.00	43.29	44.18	3	1.80	7.99	2.22	6	
500	20.06.26	06-07-22.77	-0.74	42.77	47.98	18	1.76	7.06	1.70	12	
501	20.06.26	06-29-59.90	-1.08	42.31	46.92	48	1.81	5.90	1.06	5	
502	20.06.26	13-22-02.62	-0.45	42.76	47.80	6	1.75	7.83	2.13	10	
503	20.06.26	13-22-31.27	-0.65	42.69	47.82	18	1.76	7.82	2.12	11	
504	20.06.26	13-26-51.56	-1.02	42.71	47.69	15	1.78	6.62	1.45	11	
505	20.06.26	14-15-22.98	-0.45	42.79	47.99	18	1.75	6.86	1.59	9	
506	20.06.26	14-36-45.24	0.20	42.80	48.05	24	1.72	7.09	1.71	8	
507	20.06.26	15-59-26.70	0.17	42.79	48.01	24	1.72	6.97	1.65	7	
508	20.06.26	19-02-26.83	-0.69	42.77	48.05	24	1.76	7.47	1.93	12	
509	20.06.26	21-22-29.35	-0.23	41.48	47.35	60	1.75	7.12	1.73	6	
510	20.06.26	23-52-54.36	-0.85	42.86	45.38	24	1.76	8.25	2.36	10	
511	21.06.26	01-39-53.27	-0.02	42.92	47.05	6	1.74	5.22	0.68	9	
512	21.06.26	07-04-46.76	-1.65	42.58	45.40	18	1.80	7.94	2.19	8	
513	21.06.26	12-37-32.28	-2.81	42.91	45.45	9	1.83	8.03	2.24	9	
514	22.06.26	05-03-47.85	-2.14	42.41	49.71	48	1.79	8.28	2.38	5	
515	22.06.26	09-07-49.71	-0.30	42.49	46.75	15	1.77	5.17	0.65	7	
516	22.06.26	09-59-10.22	-0.64	41.92	47.55	6	1.76	6.88	1.60	11	
517	22.06.26	10-44-42.41	-0.37	42.45	47.85	6	1.75	6.46	1.37	10	
518	22.06.26	14-06-11.41	-0.02	42.31	47.99	3	1.73	6.90	1.61	12	
519	22.06.26	23-45-12.21	-2.40	41.76	48.99	9	1.82	7.39	1.88	7	
520	22.06.26	23-54-56.35	-1.07	40.86	47.83	18	1.77	7.48	1.93	6	
521	23.06.26	04-07-55.94	-2.86	42.70	43.29	1	1.77	9.86	3.26	11	
522	23.06.26	05-43-42.98	-1.67	42.66	47.82	18	1.79	6.95	1.64	6	
523	23.06.26	14-00-35.84	-0.66	41.57	47.89	33	1.76	6.50	1.39	4	
524	23.06.26	16-30-29.20	-0.29	41.75	47.73	24	1.75	5.71	0.95	3	
525	23.06.26	19-51-40.80	-0.11	43.02	46.60	15	1.73	6.82	1.57	12	
526	24.06.26	00-20-43.80	0.87	41.79	47.76	9	1.67	5.27	0.71	6	
527	24.06.26	01-12-15.78	-1.13	42.40	47.97	18	1.80	6.62	1.46	8	
528	24.06.26	03-40-30.70	-1.14	42.17	45.72	18	1.78	7.14	1.75	10	
529	24.06.26	07-52-31.27	0.18	42.13	45.98	24	1.72	6.38	1.32	6	
530	24.06.26	10-36-50.89	-0.36	42.82	46.00	6	1.75	5.90	1.05	7	
531	24.06.26	11-31-05.37	0.32	42.38	48.06	6	1.71	6.60	1.45	6	
532	24.06.26	13-16-21.22	0.26	43.05	46.72	6	1.71	5.43	0.80	5	
533	25.06.26	00-20-13.53	-1.13	42.12	48.65	24	1.78	7.61	2.01	11	
534	25.06.26	06-02-55.93	0.41	42.68	46.29	18	1.71	7.76	2.09	10	
535	25.06.26	08-17-48.61	-1.21	42.94	45.62	9	1.78	7.56	1.98	8	
536	25.06.26	19-31-39.83	-0.02	42.42	45.69	18	1.73	7.52	1.96	9	
537	26.06.26	00-59-11.57	-0.96	42.47	45.78	18	1.77	6.49	1.38	9	
538	26.06.26	15-16-44.96	0.90	42.63	47.42	3	1.68	6.22	1.23	9	
539	26.06.26	17-55-48.57	0.04	42.23	45.74	15	1.73	6.11	1.17	6	
540	27.06.26	08-01-58.28	0.00	42.52	46.95	18	1.72	4.86	0.48	6	
541	27.06.26	16-04-24.70	-0.77	42.75	45.31	9	1.76	7.09	1.72	8	
542	27.06.26	17-13-17.77	-0.93	40.69	46.93	48	1.76	7.24	1.80	5	
543	27.06.26	18-39-33.33	0.24	42.72	47.49	6	1.72	6.34	1.30	7	
544	27.06.26	19-19-34.44	-1.44	41.47	47.32	9	1.80	7.36	1.87	8	
545	28.06.26	06-36-27.01	-3.04	40.13	49.56	34	1.80	8.72	2.62	3	
546	28.06.26	09-05-49.18	-1.00	42.87	47.34	18	1.82	5.18	0.65	5	
547	28.06.26	10-59-14.15	-0.39	41.72	47.79	3	1.75	7.32	1.84	8	
548	28.06.26	17-35-03.30	-1.26	43.11	46.51	15	1.81	6.44	1.36	8	
549	28.06.26	18-07-48.70	0.16	42.30	46.47	9	1.72	5.30	0.72	6	
550	28.06.26	23-54-26.25	5.58	41.12	47.14	18	1.53	7.30	1.83	3	
551	28.06.26	23-54-31.03	0.74	41.40	47.31	9	1.69	6.69	1.49	4	
552	29.06.26	12-29-38.32	-0.83	42.55	47.34	15	1.82	5.14	0.63	5	
553	29.06.26	15-10-39.92	0.65	43.00	47.17	6	1.68	6.06	1.14	6	
554	29.06.26	20-50-30.63	-2.42	41.12	43.69	15	1.77	8.49	2.49	4	
555	30.06.26	04-06-32.91	-1.63	42.98	47.86	9	1.80	6.90	1.61	8	
556	30.06.26	16-17-10.16	3.61	43.16	46.66	18	1.45	5.11	0.62	3	
557	30.06.26	19-07-34.98	0.31	41.94	47.50	6	1.72	7.16	1.75	9	

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., Бжассо М.А., Гамидова А.М., Сагателова Е.Ю., Павличенко И.Н. Каталог землетрясений Северо-Восточного Кавказа (территория Дагестана и приграничные зоны) и акватории Среднего Каспия за I квартал 2026 г. // Мониторинг. Наука и технологии. 2026. №2(68). С. 103-114.
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., Bzhasso M.A., Gamidova A.M., Sagatlova E.Yu., Pavlichenko I.N. Catalog of earthquakes of the North-Eastern Caucasus (Dagestan and border areas) and the Middle Caspian for the I quarter of 2026. *Monitoring. Nauka i tekhnologii*. 2026. No. 2(68). Pp. 103-114.
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. *Experimental'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 Заракман Ашуралиевич

заведующий отделом Дагестанского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 367025, Махачкала, Россия

Асекова Зулфия 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 Gadjeivna

Engineer of the Departmenta, Dagestan Branch of Federal Research Center United Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, 367025, Makhachkala, Russia

Поступила в редакцию 30.07.2026 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 Мансовна

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

Shikhnabieva 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 25.09.2026 г.

Отпечатано в ООО «ЦСМОСипР»

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

Цена свободная. Тираж 350

Заказ №3